



**Óscar Agostinho
Mendes Pereira**

**Infra-Estruturas Eólicas: Módulo Autónomo de
Monitorização**



**Óscar Agostinho
Mendes Pereira**

**Infra-Estruturas Eólicas: Módulo Autónomo de
Monitorização**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor. Manuel Bernardo Salvador Cunha, Professor Auxiliar, e do Prof. Doutor. João Paulo Trigueiros da Silva Cunha, Professor Associado com Agregação do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que fizeram e fazem parte da minha vida, e me acompanharam ao longo da minha formação académica. Em especial aos meus pais, irmãos e amigos, nomeadamente ao Dr. Jorge Correia.

o júri

presidente

Prof. Doutor António Rui Oliveira Silva Borges

Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes

Investigador Auxiliar do Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho

Prof. Doutor Manuel Bernardo Salvador Cunha

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João Paulo Trigueiros da Silva Cunha

Professor Associado com Agregação do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Aproveito esta oportunidade para agradecer ao meu orientador, Prof. Doutor Manuel Bernardo Cunha e co-orientador, Prof. Doutor João Paulo Cunha, pela criação das condições para o desenvolvimento deste trabalho, por todo o apoio científico e técnico.

Agradeço também ao Eng. David Ribeiro por toda a disponibilidade, colaboração e sugestões apresentadas. Agradeço também ao Eng. Luís Paula, Eng. Fábio Marques, Eng. Virgílio Bento, Márcio Colunas e Ricardo Bento pelo companheirismo e apoio.

Quero ainda agradecer aos meus pais, as minhas irmãs e aos meus amigos por todo o apoio e incentivo demonstrado ao longo percurso académico.

Palavras-chave

Energias Renováveis, Energia Eólica, Aerogeradores, Redes sem fios, Sensores, Microcontroladores.

Resumo

Esta dissertação descreve o desenvolvimento de um sistema autónomo com capacidade para ler, processar e armazenar dados obtidos a partir de um aerogerador genérico, enquadrável na classe dos sistemas de micro e mini geração eólica. Este sistema tem como principais características a capacidade de funcionar em modo autónomo com baixo consumo de energia, possibilitar uma monitorização local e remota dos parâmetros eólicos e eléctricos, comunicar sem fios com dispositivos externos e baixo custo de produção por forma a ser facilmente adaptada aos mini-aerogeradores.

O trabalho desenvolvido incluiu o projecto e instanciação do protótipo de um módulo de monitorização em placa de circuito impresso, com o objectivo de responder aos requisitos deste projecto. Para isso foi elaborado um estudo de quais os componentes electrónicos mais apropriados e qual o modo de proceder à sua integração no sistema.

O sistema baseia-se na utilização de um microcontrolador e inclui ainda circuitos de alimentação, sistema de comunicação sem fios, armazenamento de informação, selecção individual de cada sensor com vista a optimização de consumo. O microcontrolador implementa também um sistema de ficheiros FAT32 implementado num SD Card, para gerir e armazenar dados.

A dissertação incluiu ainda uma visão geral da evolução e expansão da tecnologia dos aerogeradores por todo mundo, apresentação e análise dos resultados obtidos bem como conclusões e indicações sobre trabalho futuro.

Keywords

Renewable Energy, Wind Energy, Wind Turbine, Wireless, Sensors, Microcontrollers.

Abstract

This dissertation describes the development of an autonomous system with the ability of gathering, processing and storing data. These data are gathered from a generic wind turbine that belongs to micro and mini generation wind turbine class systems. This system has, as main characteristics, the ability to function in an autonomous and low power manner, making possible both remote and local monitorization of the wind intensity/direction, electrical parameters and wireless communication with external devices. The systems low production cost results in an easiness of adaptation to mini wind turbine systems.

The developed work includes the design and development of a monitoring module in form of a Printed Circuit Board with the purpose of responding to the requisites of the project. A study was made in order to select the most suitable electronic components and the best way to integrate them into the system.

The core of the system consists of a microprocessor and includes a power supply, wireless communication and a storing module. The system also allows the individual selection of each sensor in order to optimize the systems consumption. The micro controller implements a FAT 32 file system in order to manage and store the obtained data.

This dissertation also includes a look into the state of the art, evolution and expansion of the wind turbines' technology around the world. Presented is an analysis and discussion of the obtained results and also conclusion and suggestions regarding future work.

Índice

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Enquadramento	9
1.2	Objectivos	10
1.3	Estrutura da Dissertação	10
2	ESTADO DA ARTE	13
2.1	Introdução.....	13
2.2	Ventos	13
2.3	Energia do Vento	14
2.3.1	Densidade do Ar	14
2.3.2	Área de Varrimento do Rotor	14
2.3.3	Distribuição da Pressão no Rotor	14
2.4	Lei de Betz.....	15
2.5	Energia Eólica.....	16
2.6	História da Energia Eólica e as suas Utilizações.....	17
2.7	A Potência Eólica Instalada no Mundo	18
2.8	Monitorização	22
2.9	Aerogeradores	23
2.9.1	Aerogerador de Eixo Vertical	26
2.9.2	Aerogerador de Eixo Horizontal.....	27
2.10	Composição do Aerogerador	27
2.10.1	Pás, Cubo e Eixo.....	28
2.10.2	Caixa de Velocidades	29
2.10.3	Gerador.....	29
2.10.4	Torre	29
2.11	Impacto Ambiental.....	30

2.11.1	Emissão de Ruído.....	30
2.11.2	Impacto Visual	31
2.11.3	Impacto Sobre a Fauna e Flora.....	31
2.12	Controlo de Potência	32
2.12.1	Controlo do Ângulo de Passo das Pás (Pitch Controlled)	32
2.12.2	Controlo por Perda Aerodinâmica (Stall Regulation)	33
2.12.3	Energy Harvesting.....	34
3	DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO AUTÓNOMO DE MONITORIZAÇÃO ..	37
3.1	Introdução	37
3.2	Características da Torre Eólica	38
3.3	Sensores	40
3.3.1	Sensor de Velocidade do Vento (Anemómetro).....	40
3.3.2	Sensor de Direcção do Vento	43
3.3.3	Sensor de Corrente	43
3.4	Arquitectura do Hardware	47
3.4.1	Alimentação	47
3.4.1.1	Painel Solar	48
3.4.1.2	Regulador de Tensão de 5V Step-Down	50
3.4.1.3	Regulador de Tensão de 3V e 5V	51
3.4.1.4	Carregador de Baterias.....	53
3.4.1.5	Bateria.....	54
3.4.2	Microcontrolador	55
3.4.3	Ligação Wireless.....	58
3.4.4	Módulo de Armazenamento de Dados	59
3.4.5	Medição da Tensão das Fases	60
3.4.6	Switch Analógico	62
3.4.7	Real Time Clock and Calendar	62
3.4.8	Implementação do Hardware	63
3.5	Arquitectura do Software.....	65
3.5.1	Estrutura do Software do Microcontrolador	65
3.5.2	Plataforma MatLab.....	68
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	69

4.1	Introdução.....	69
4.2	Resultados em Laboratório	70
4.2.1	Tensão do Pannel.....	71
4.2.2	Velocidade do Vento	72
4.2.3	Correntes nas Fases	73
4.2.4	Direcção do Vento.....	74
4.2.5	Tensões das Fases.....	77
4.3	Resultados Práticos	78
4.3.1	Teste de Autonomia.....	78
4.3.1.1	Tensão do Pannel Solar	79
4.3.1.2	Velocidade do Vento	80
4.3.2	Teste no Aerogerador	81
4.3.2.1	Velocidade do Vento	82
4.3.2.2	Direcção do Vento.....	83
5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	85
5.1	Conclusões.....	85
5.2	Trabalho Futuro.....	86
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXO A	91
	ANEXO B	97

Lista de Figuras

Figura 2.1 Tubo de Corrente de Betz [4]	16
Figura 2.2 Moinho Holandês [6]	18
Figura 2.3 Capacidade Instalada no Final de 2009 [8].	21
Figura 2.4 Nova Capacidade Instalada em 2009 [8].	21
Figura 2.5 Países com Mais Capacidade Instalada no Final de 2009 [8].	22
Figura 2.6 Aerogerador Inventado por Charles Brush [12].	24
Figura 2.7 Aerogerador de Gedser [13].	25
Figura 2.8 Evolução dos Aerogeradores.	25
Figura 2.9 Turbina Eixo Vertical.	27
Figura 2.10 Turbina de Eixo Horizontal.	28
Figura 2.11 Ângulo de Passo de Ataque.	33
Figura 2.12 Forças de Arrasto e Sustentação.	33
Figura 2.13 Diagrama de Blocos de uma Aplicação de Energy Harvesting, Texas Instruments [26].	34
Figura 3.1 Aerogerador de 20kW.	38
Figura 3.2 Desempenho do Aerogerador de 20kW [27].	39
Figura 3.3 Anemómetro de Três Copos.	41
Figura 3.4 Anemómetro Sónico.	42
Figura 3.5 Sensor de Corrente Efeito de Hall [33]	45
Figura 3.6 Curva Característica do Sensor [33].	45
Figura 3.7 Diagrama de Blocos do Hardware	47
Figura 3.8 Diagrama de Blocos da Alimentação	48
Figura 3.9 Painel Solar 5W [34].	49
Figura 3.10 Curva Característica do Painel Solar [35].	49
Figura 3.11 Diagrama de Blocos do TL2575-05 [36]	51
Figura 3.12 Esquema do TPS6300x [37].	52
Figura 3.13 Ciclo de Carga Típico [38].	54
Figura 3.14 Diagrama de Blocos da PIC24FJ128GA006 [39]	57
Figura 3.15 Módulo Bluetooth [40].	59

Figura 3.16 Diagrama de Blocos da Função para Gravar Dados no Cartão.....	60
Figura 3.17 Diagrama de Blocos do Bloco Medidor de Tensão.	61
Figura 3.18 Módulo Autónomo de Monitorização.....	64
Figura 3.19 Diagrama de Blocos do Software do Microcontrolador	66
Figura 3.20 Exemplo de conversão de Binário para Hexadecimal	67
Figura 4.1 Circuito de Testes.....	70
Figura 4.2 Tensão do Painel em Laboratório	71
Figura 4.3 Velocidade do Vento em Laboratório.....	72
Figura 4.4 Correntes das Fases em Laboratório.	73
Figura 4.5 Direcção do Sensor da Torre.....	74
Figura 4.6 Direcção do Sensor da Auxiliar	74
Figura 4.7 Tensão das Fases.....	77
Figura 4.8 Teste Prático de Autonomia.....	78
Figura 4.9 Tensão do Painel Solar na Prática.....	79
Figura 4.10 Velocidade do Vento no Teste de Autonomia.	80
Figura 4.11 Montagem do Módulo na Torre Eólica.....	81
Figura 4.12 Velocidade do Vento da Torre	82
Figura 4.13 Direcção do Vento do Sensor Instalado na Torre.	83
Figura A.1 Esquema do Bloco de Alimentação	91
Figura A.2 Esquema do Cartão de Memória, Switch e Conectores	92
Figura A.3 Esquema do Microcontrolador.....	93
Figura A.4 Esquema do Relógio (RTCC)	94
Figura A.5 Esquema do Bloco Medidor de Tensão	95
Figura B.1 Layout geral do Módulo Autónomo de Monitorização.....	97
Figura B.2 Layout superior do Módulo Autónomo de Monitorização.....	97
Figura B.3 Layout inferior do Módulo Autónomo de Monitorização.....	98

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Características do gerador de 20kW.	40
Tabela 3.2 Consumo Energético dos Dispositivos	48
Tabela 3.3 Identificação dos Valores.....	67
Tabela 4.1 Tabela de Correspondência.....	75

1 Introdução

1.1 Enquadramento

As energias alternativas e renováveis são um importante recurso na luta contra o aquecimento global. Destas energias, a energia eólica é a que está em melhor posição para ser utilizada em massa nos próximos anos.

A geração de energia eólica industrial em Portugal entrou em força recentemente, com os concursos para grandes parques eólicos e com um enorme investimento da EDP nos EUA, tornando-se a 5ª maior produtora eólica do mundo.

A energia eólica apresenta-se como uma energia renovável e gratuita, pelo que não importa a quantidade que se utiliza hoje já que ela estará igualmente disponível no futuro. Por outro lado, esta energia é uma fonte de energia limpa, isto é, não produz gases de efeito de estufa nem outros agentes de poluição. A energia eólica tem um papel de complementaridade na produção de energia eléctrica sendo que contribui para a diversificação dos modos de produção e para diminuir a nossa dependência energética do exterior, materializada na importação de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão).

A energia eólica apresenta-se então, pelas razões anteriormente referidas, como um contributo para alcançar os compromissos internacionais, nomeadamente o Protocolo de Quioto e a directiva comunitária impõe que a sua representatividade na produção de electricidade corresponda a 39%, até 2010. Por cada MWh de energia eléctrica de origem eólica são reduzidas entre 0,8 a 0,9 toneladas de emissões de gases de efeito de estufa que teriam origem na utilização dos combustíveis fósseis na produção de energia eléctrica. A produção eólica deverá ser acompanhada de medidas eficazes de redução do consumo de energia através do aumento da eficiência energética e da utilização racional da energia.

1.2 Objectivos

Esta dissertação descreve a concepção e desenvolvimento de um módulo autónomo capaz de monitorizar e armazenar os vários parâmetros eólicos e eléctricos. Os objectivos específicos que se pretendem alcançar são;

- ❖ O módulo autónomo de monitorização destina-se à monitorização de micro e mini-aerogeradores, nomeadamente ao que as pessoas instalam próximo das suas habitações;
- ❖ Concepção e desenvolvimento do interface com um conjunto de sensores;
- ❖ Monitorização dos parâmetros eólicos, medindo a direcção e velocidade do vento;
- ❖ Monitorização da quantidade de energia produzida pelo aerogerador;
- ❖ Suporte à comunicação com dispositivos sem fios;
- ❖ Armazenamento de informação para posterior processamento.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

No capítulo 1 é efectuada uma introdução à dissertação, e nele se descreve o enquadramento da energia eólica, a importância das energias renováveis bem como os objectivos genéricos deste projecto. Este capítulo termina com a estrutura da dissertação que contém um resumo dos capítulos que a constituem.

No capítulo 2, é realizado um estudo do estado da arte focando-se em várias áreas. De forma a conhecer a fonte da energia eólica estudou-se a origem dos ventos, assim como a história e uso da energia eólica ao longo dos tempos e a utilização da mesma para gerar energia eléctrica. Faz-se também uma análise sobre a potência eólica instalada no mundo. E para terminar efectua-se o estudo sobre aerogeradores, com ênfase no tipo de aerogeradores existentes, qual o mais comum, como têm evoluído ao longo dos anos e como são constituídos e os vários mecanismos de controlo.

No capítulo 3, identificam-se os meios técnicos necessários à monitorização dos diferentes parâmetros, nomeadamente a tensão e corrente do aerogerador e a direcção e velocidade vento, bem como a comunicação sem fios e o armazenamento dos valores

recolhidos. Analisa-se igualmente o desenvolvimento do hardware que incorpora os componentes electrónicos capazes de cumprir os objectivos deste projecto. Descreve-se também o desenvolvimento do software apropriado para realizar uma correcta comunicação entre os vários periféricos, com vista a efectuar todo o necessário processamento de dados.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos a partir do equipamento desenvolvido, tendo em vista a análise do desempenho do sistema.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, propostas e algumas sugestões para trabalho futuro.

2 Estado da Arte

2.1 Introdução

Como é sabido, as energias renováveis assumem cada vez mais um papel fundamental na produção de energia eléctrica, não só pela crise energética que se vive actualmente mas também por ser uma energia limpa. Neste capítulo efectua-se um levantamento sobre o aproveitamento da energia do vento, bem como sobre a situação actual da exploração de energia, com ênfase no actual desenvolvimento de unidades de monitorização dos parâmetros das torres eólicas focando, em especial, os mini e micro-aerogeradores.

2.2 Ventos

A produção de energia eólica só é possível devido à existência de ventos. Os ventos surgem devido a diferenças existentes no aquecimento da atmosfera, decorrentes da orientação dos raios solares, dos movimentos da Terra e de outros factores. Conclui-se, consequentemente, que existem regiões que, pela sua localização, são mais propícias à ocorrência de ventos. A incidência da luz solar na superfície terrestre tem como efeito o aquecimento do ar: este fenómeno é mais notório nas proximidades da linha equatorial. O ar quente destas zonas tende a subir, e o ar mais frio das zonas polares tendem a ocupar o espaço deixado pelo ar quente. Esta deslocação é geralmente designada por ventos horizontais. Por outro lado, o ar ao ficar mais quente, torna-se mais leve e sobe, o que leva a que o ar mais frio, que se encontra a maior altitude, desça para o ar quente subir. Este processo é repetitivo, ou seja, quando o ar arrefece volta a descer, subindo o ar mais quente para o espaço deste; esta deslocação de ar é designada por ventos verticais.

Existem, consequentemente, regiões onde os ventos tendem a atingir com regularidade velocidades mínimas para gerar energia. Normalmente estas zonas são montanhas ou zonas costeiras, ou seja, locais onde não existem obstáculos ao vento [1].

2.3 Energia do Vento

A exploração da energia do vento depende de vários factores. Por exemplo, à mesma velocidade e à mesma altitude, podem ser geradas energias diferentes. Logo, a quantidade de energia extraída de uma torre eólica, depende ainda de factores exteriores tais como:

2.3.1 Densidade do Ar

A densidade de um corpo define-se como o quociente entre a massa e o volume desse mesmo corpo. Um corpo em movimento tem uma certa energia cinética que é tanto maior ou menor conforme a sua densidade. Uma das características do ar é a densidade, com real impacto na exploração de energia eólica, i.e., a quantidade de energia extraída de uma torre eólica é maior quanto mais denso for o ar. A densidade do ar seco ao nível do mar e com uma temperatura de 20°C é de aproximadamente $1,2\text{kg/m}^3$. Contudo a densidade do ar diminui gradualmente com a altitude.

2.3.2 Área de Varrimento do Rotor

Pode-se definir como área de varrimento do rotor a circunferência dentro da qual as pás agregadas ao eixo do rotor actuam fisicamente. A área de varrimento do rotor é proporcional ao quadro do raio das pás. Uma torre eólica cujo comprimento das pás é duas vezes maior do que uma outra, produz quatro vezes mais energia.

2.3.3 Distribuição da Pressão no Rotor

À medida que ao ar se aproxima do rotor a pressão do ar aumenta gradualmente, uma vez que o rotor actua como uma barreira à livre circulação do vento. Depois de passar pelo aerogerador a pressão do vento diminui, estabilizando gradualmente à medida que se afasta. Porém a passagem do vento através da turbina gera alguma turbulência em redor da mesma [2].

2.4 Lei de Betz

A desaceleração do vento está directamente relacionada com a energia extraída do vento, isto é, quanto maior for a energia cinética extraída do vento pelo aerogerador maior será a travagem que o vento sofrerá. Se teoricamente fosse possível extrair toda a energia do vento, o ar sairia com velocidade nula, ou seja, o ar não poderia abandonar a turbina. Nesse caso não seria possível extrair nenhuma energia, uma vez que também não entraria ar nas pás do aerogerador. No caso extremo oposto, consideramos o ar a passar pelo tubo de vento sem nenhum impedimento. Neste caso também não será possível extrair energia do vento.

Entre estes dois extremos existe um valor para o qual a eficiência da conversão da energia do vento em energia mecânica é máxima. Este corresponde à situação em que um aerogerador ira travar o vento até cerca de 2/3 da sua velocidade inicial. Este valor obtém-se da formulação de 1919, realizada pelo físico Albert Betz, e conhecida como Lei de Betz [3].

A potência do vento que passa perpendicularmente através de uma área circular, pode ser descrita pela equação:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi r^2 \quad \text{Equação 2.1}$$

onde

P= potência média do vento em watts [W]

ρ = densidade do ar seco = 1,225 [kg / m³] (PTN)

v = velocidade média do vento [m/s]

r = raio do rotor em metros[m]

Segundo a Lei de Betz, a energia mecânica máxima que é possível obter num aerogerador está limitada a aproximadamente 59% (16/25) da energia cinética do vento.

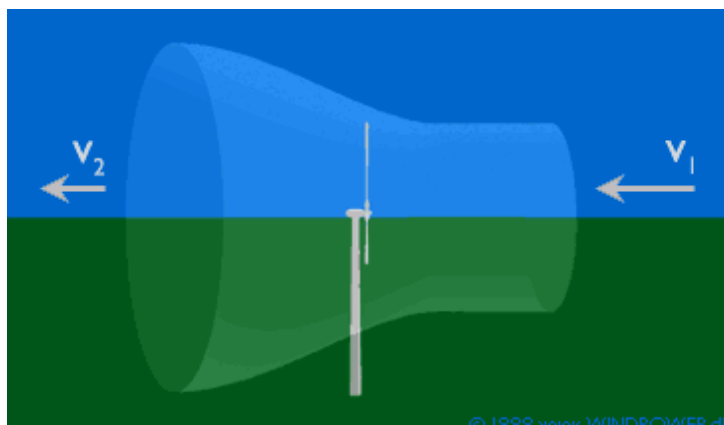


Figura 2.1 Tubo de Corrente de Betz [4]

A teoria de Betz define o modelo da passagem do ar antes e após a turbina por um tubo de corrente de Betz (Figura 2.1), onde:

- V_1 é a velocidade do vento antes das pás da turbina;
- V_2 é a velocidade do vento após ter transferido energia às pás da turbina.

Sendo $V_1 > V_2$, e admitindo-se que estes vectores velocidade são paralelos ao eixo do rotor.

2.5 Energia Eólica

A energia eólica é um tipo de energia renovável com uma utilização crescente. Pode-se definir energia eólica como a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, usualmente chamada de vento. O seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética em energia mecânica. Alguns dos dispositivos capazes de aproveitar esta energia são, nomeadamente, turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, cata-ventos e moinhos.

Uma das potenciais soluções para a presente crise energética e alterações climáticas é, consequentemente, a energia eólica, fonte de energia natural e inesgotável. A evolução desta tecnologia está no bom caminho para atingir uma poupança de 10 milhões de toneladas de CO₂ até 2020. Isso significa que mais de 65% de todas as reduções de emissões apresentadas como compromisso pelos países industrializados nas negociações de clima em Copenhague, poderiam ser atingidas somente através da energia eólica gerada

a nível mundial. *“A energia eólica é, com frequência, a opção mais atraente para a geração de energia, tanto em termos económicos, quanto no que se refere ao aumento da segurança energética, sem mencionar os benefícios para o desenvolvimento económico e para o meio ambiente”* [5].

Os aerogeradores têm com função transformar a energia cinética do vento, resultante do deslocamento de massas de ar, em energia mecânica e, posteriormente, em energia eléctrica. Este é o princípio básico dos aerogeradores. O rotor começa por converter a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação, possibilitando em seguida que um gerador a converta em energia eléctrica.

Os aerogeradores, contudo, não têm a capacidade de transformar a totalidade da energia do vento em energia eléctrica. O rendimento depende de aerogerador para aerogerador, dos locais onde estes se encontram, e da energia local do vento. Independentemente do sistema eólico em causa, este só começa a funcionar a partir de uma determinada velocidade do vento, designada por velocidade de entrada ou inicial, a qual é necessária para vencer perdas e atritos. Para os sistemas eólicos, a velocidade de rotação óptima varia com a velocidade do vento. Um sistema eólico tem o seu rendimento máximo à velocidade nominal. Uma vez atingida a velocidade nominal, os sistemas de controlo diminuem a velocidade do rotor se esta tender a aumentar. Esta necessidade surge como medida de protecção do equipamento e para manter um bom acoplamento rotor/carga.

2.6 História da Energia Eólica e as suas Utilizações

A utilização da energia eólica não é um acontecimento recente. Segundo algumas publicações o vento começou a ser usado por volta de 4000 a.C., o que pode ser testemunhado pela descoberta recente de um barco parcialmente movido a vento. Por volta de 1000 a.C. começa-se a utilizar barcos movidos, exclusivamente, a partir da força dos ventos. Na época dos descobrimentos a energia eólica aplicada a embarcação à vela ganha especial importância. Este tipo de embarcação continuou a ser o principal meio para a deslocação em longas viagens através dos mares, e só perdeu a sua importância com o surgimento do navio a vapor. Contudo, por volta do ano 200 a.C., também na agricultura começa aparecer sinal do uso do vento para ajudar nas diversas funções do trabalho. A energia eólica auxiliava tarefas com a moagem dos grãos e o bombeamento de água. Os

moinhos de vento de eixo horizontal apareceram na região mediterrânea por volta do século X, e estavam orientados de forma permanente para os ventos marítimos predominantes.

No século XV surge na Holanda um novo tipo de moinho caracterizado por conter um corpo fixo e uma parte rotativa com uma componente que apontava as pás na direcção do vento.



Figura 2.2 Moinho Holandês [6]

Para que o desenvolvimento humano possa continuar, mantendo-se o actual crescimento das necessidades energéticas, é necessário encontrar fontes de energias renováveis ou virtualmente inesgotáveis. A tecnologia das turbinas eólicas introduz novas formas de converter energia eólica em energia útil. Um número muito significativo de pesquisas e aplicações relacionadas com energia eólica têm sido demonstradas e publicadas. Consequentemente, a energia eólica é actualmente a fonte de energia com maior crescimento a nível mundial, tentando assegurar que a indústria, empresas e habitações possam vir a ser alimentadas a partir de electricidade limpa e renovável por muitos e longos anos [7].

2.7 A Potência Eólica Instalada no Mundo

Na última década tem-se assistido a um enorme crescimento da energia eólica, com perspectivas promissoras para um contínuo crescimento da indústria eólica mundial no futuro. Mesmo considerando uma desaceleração no aumento da potência instalada nos últimos anos em alguns países, devido um pouco à crise mundial, o desenvolvimento de aerogeradores em tamanho e em capacidade bem como a procura de novos mercados

apontam boas perspectivas para um contínuo crescimento do sector eólico. A tabela 2.1 mostra a potência eólica instalada em diversos países desde 2004 até 2009.

	Potência acumulada ao fim de cada ano [MW]					
Países	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Estados unidos	6.752	9.149	11.603	16.819	25.170	35.159
China	764	1.266	2.599	5.912	12.210	26.010
Alemanha	16.628	18.428	20.622	22.247	23.903	25.777
Espanha	8.263	10.028	11.630	15.145	16.740	19.149
Índia	2.983	4.430	6.270	7.850	9.587	10.925
Itália	1.265	1.718	2.123	2.726	3.736	4.850
França	390	757	1.567	2.455	3.404	4.521
Reino Unido	897	1.353	1.963	2.389	3.288	4.092
Portugal	523	1.022	1.716	2.130	2.862	3.535
Dinamarca	3.118	3.128	3.136	3.125	3.160	3.497
Canadá	444	683	1.460	1.846	2.369	3.319
Holanda	1.078	1.224	1.559	1.747	2.225	2.240
Japão	940	1.040	1.309	1.528	1.880	2.056
Austrália	380	579	817	817	1.494	1.877
Suécia	442	509	571	831	1.067	1.579
Irlanda	353	495	746	805	1.245	1.260
Grécia	466	573	758	873	990	1.109
Áustria	607	819	965	981	995	995
Turquia	20	20	65	207	334	796
Polónia	58	73	153	276	472	666
Brasil	29	29	237	247	339	600
Bélgica	97	167	194	287	384	555
Nova Zelândia	170	168	171	322	325	497
China Taipei	nd	104	188	280	358	436
Noruega	160	268	325	333	428	431
Egipto	145	145	130	310	390	430

México	nd	2	84	85	85	402
Coreia do Sul	8	120	176	192	278	364
Marrocos	54	64	64	125	125	253
Bulgária	nd	14	36	57	158	214
Hungria	nd	18	61	65	127	201
República Checa	nd	30	57	116	150	191
Finlândia	82	82	86	110	140	147
Estónia	nd	33	33	59	78	142
Costa Rica	71	71	74	74	74	123
Lituânia	nd	7	55	52	54	91
Ucrânia	57	77	86	89	90	90
Irão	11	32	47	67	82	82
Luxemburgo	35	35	35	35	36	36
Letónia	nd	27	27	27	30	30
Argentina	26	27	28	30	30	30
Outros Países	239	211	225	255	298	456
Total	47.555	59.024	74.151	93.927	121.188	159.213

Tabela 2.1 Potência Instalada no Mundo [8].

O primeiro lugar no que toca à produção de energia eólica continua a pertencer aos Estados Unidos, com uma capacidade instalada de 35GW, com a instalação de 10 GW em 2009, a que corresponde um crescimento de 39%. Dos países Europeus, os líderes são a Alemanha (25,8 GW) e Espanha (19,2 GW). Contudo países como Reino Unido, França ou Itália apresentam um desenvolvimento considerável, tendo crescido aproximadamente mais 1 GW em 2009.

Em todo mundo, a capacidade de energia eólica cresceu 31% em 2009, adicionando cerca de 40 GW para um total próximo de 160 GW. Um terço deste crescimento em 2009 foi de responsabilidade da China [8].

Portugal ocupa um lugar de destaque no ranking europeu de produção de energia eólica, sendo a potência instalada de 3,5 GW. A União Europeia apresenta uma capacidade instalada de 74,7 GW; quase metade da potência instalada no mundo pertence à União Europeia.

A Comissão Europeia apresenta actualmente como expectativas um crescimento para a capacidade de energia eólica instalada de 120 GW para 222 GW até 2020, quase duplicando as expectativas de 2020 a 2030, com uma previsão de 280 GW, em comparação com os 146 GW no seu cenário traçado em 2008 [9].



Figura 2.3 Capacidade Instalada no Final de 2009 [8].

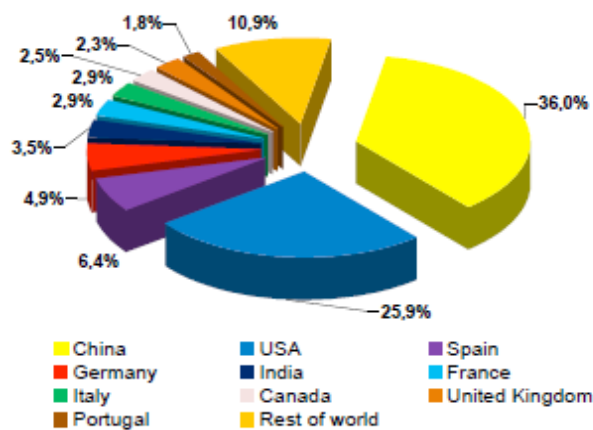


Figura 2.4 Nova Capacidade Instalada em 2009 [8].

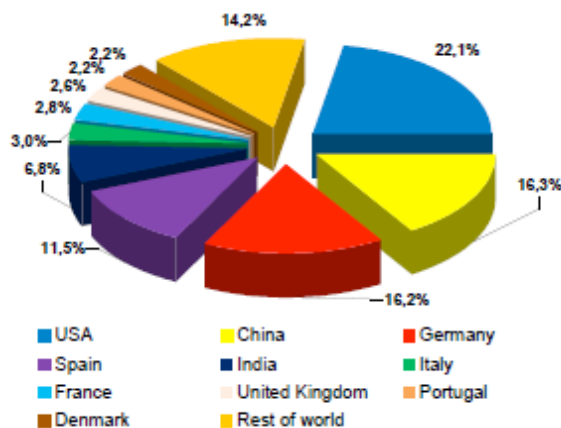


Figura 2.5 Países com Mais Capacidade Instalada no Final de 2009 [8].

Na Figura 2.4 estão representados os países com mais energia eólica instalada em 2009, onde ganham destaque países como os Estados Unidos e China. Os cinco primeiros países representam 72,9% da potência instalada em todo mundo.

Portugal encontra-se em nono lugar na lista dos países com mais energia instalada, adicionando 673 MW em 2009, o que corresponde a 23.5% da capacidade instalada em 2008.

Com uma participação de 47,9%, uma em cada duas turbinas instaladas no mundo encontra-se na Europa. O sector eólico Europeu apresentava, no final de 2009, uma potência total instalada de 76,2 GW. As perspectivas futuras em relação a este mercado são de um grande crescimento, com metas ambiciosas para 2020.

2.8 Monitorização

A monitorização dos diferentes parâmetros de uma torre eólica encontram-se actualmente bastantes desenvolvidos, mas só para os geradores de grande porte, isto é, na ordem dos muitos kW a vários MW, em alguns casos possuem sistemas de monitorização e controlo muito complexos capazes de realizar a verificação e monitorização constante de todos os parâmetros, com base no qual se efectua o controlo por forma a optimizar a produção de energia. O controlo dos aerogeradores poder ser efectuada localmente ou remotamente. O controlo local implica a instalação de um painel de instrumentos próximo da torre onde se pode efectuar algumas operações como por exemplo, arranque ou paragem do aerogerador. Porém o controlo local pode integrar uma unidade de comunicação que

possibilita um controlo remoto do aerogerador. A fim de monitorizar todo o processo, o controlador verifica todos os dados operacionais como por exemplo a velocidade e a direcção do vento [10].

Porém, este tipo de monitorização é geralmente inexistente no caso dos geradores de pequeno porte, tais como os micro e mini geradores. Este tipo de geradores é cada vez mais utilizado na geração de energia doméstica, em grande parte para consumo próprio mas também com a possibilidade de serem ligados às redes eléctricas nacionais [11].

2.9 Aerogeradores

Pode definir-se um aerogerador como sendo um gerador eléctrico suportado por uma torre, comportando um eixo de um cata-vento cujo objectivo é converter energia eólica em energia eléctrica. O sucesso deste tipo de gerador deve-se em grande parte ao facto de não queimar combustíveis fósseis e de utilizar um tipo de energia renovável, designada por energia eólica, o que se traduz actualmente numa rápida popularização da tecnologia em causa.

O primeiro aerogerador foi construído no final do século XIX por Charles Brush, hoje reconhecida como a primeira turbina de vento a funcionar de modo autónomo para a produção de energia eléctrica. Contendo características verdadeiramente impressionantes, nomeadamente um rotor com um diâmetro de 17 metros, o maior construído até então, e 177 lâminas feitas de madeira de cedro. Embora tendo um tamanho “gigantesco” não era muito eficiente no que tocava à produção de energia eléctrica, uma vez que o gerador só produzia uma potência de 12kW [12].

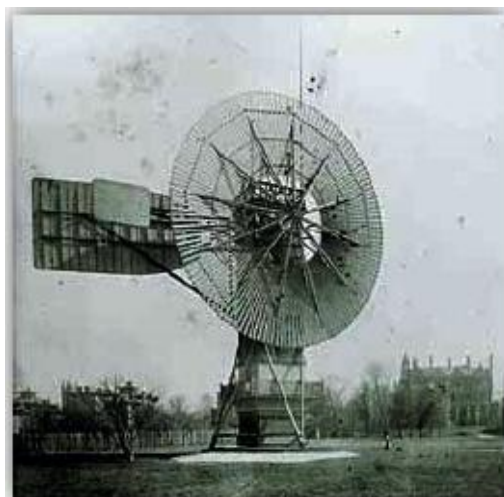


Figura 2.6 Aerogerador Inventado por Charles Brush [12].

A construção deste aerogerador tem um significado muito importante, visto que representou o primeiro passo no desenvolvimento deste tipo de tecnologias. Não tardou muito tempo até que o dinamarquês Poul la Cour, com formação na área de meteorologia, tenha descoberto que os rotores com poucas pás podem rodar a uma velocidade superior aos rotores com um número elevado de pás, gerando por isso mais energia eléctrica. Poul la Cour dedicou uma parte significativa do seu trabalho à vertente de armazenamento de energia, utilizando a electricidade produzida pelos geradores eólicos para obter hidrogénio para as lâmpadas de gás. Isto veio a produzir numerosos avanços nos aerogeradores durante o séc. XX.

Em 1950 Johannes Juul tornou-se um pioneiro no desenvolvimento de turbinas eólicas de corrente alterna. Um inovador aerogerador de 200kW foi construído em 1956-57 em Gedser, na costa sul Dinamarquesa. A primeira turbina eólica de três pás, com sistema de travagem na ponta das pás do rotor actuando quando o vento se tornava demasiado forte, equipado ainda com um gerador assíncrono. Durante 11 anos a turbina de Gedser foi o maior do mundo. Era incrivelmente resistente, funcionando sem precisar de manutenção. Em 1975 o aerogerador de Gedser foi evoluído a pedido da NASA, de modo a ser possível a sua utilização nos Estados Unidos [13].



Figura 2.7 Aerogerador de Gedser [13].

Este modelo foi o protótipo dos aerogeradores modernos, apresentando características semelhantes às dos aerogeradores de hoje. A evolução da electrónica teve um papel determinante na construção dos geradores bem como no controlo das turbinas eólicas.

Presentemente existe uma extensa diversificação na produção de aerogeradores. Os parques eólicos são cada vez mais constituídos por aerogeradores de maior potência, na ordem dos 2 a 5 MW, e de maiores dimensões, na ordem de centena de metros de altura (ver Figura 2.8). Contudo a micro geração tem vindo igualmente a crescer a um ritmo elevado, e é uma fonte de energia a ter em conta nos próximos anos.

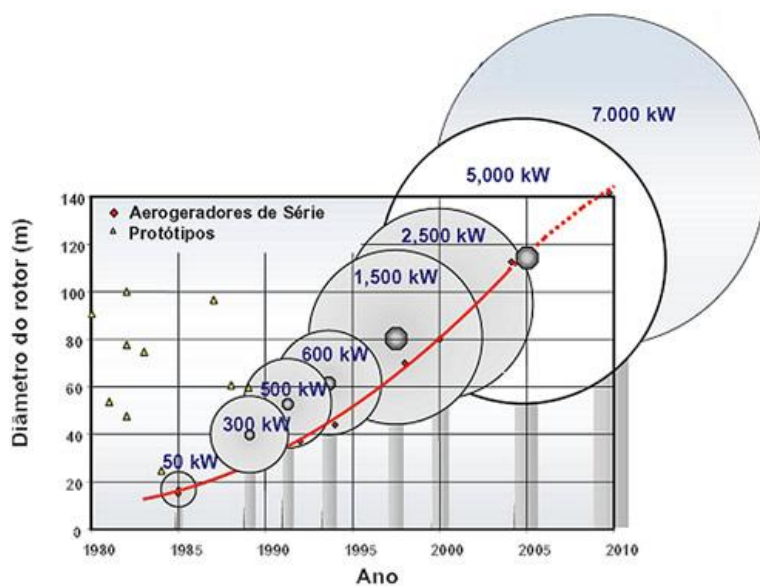


Figura 2.8 Evolução dos Aerogeradores.

A dimensão dos aerogeradores depende da potência desejada. Quanto mais energia for produzida pelo aerogerador maior é o seu tamanho. Actualmente existe uma grande gama de geradores eólicos. Os aerogeradores e aeromotores costumam ser classificados pela posição do eixo do seu rotor, que pode ser vertical ou horizontal.

2.9.1 Aerogerador de Eixo Vertical

Os aerogeradores de eixo vertical não se encontram com tanta frequência como os aerogeradores de eixo horizontal. Este tipo de gerador é geralmente mais barato do que os de eixo horizontal. As turbinas eólicas de eixo horizontal possuem algumas vantagens como, maior coeficiente de potência e menor peso. No entanto, as turbinas eólicas de eixo vertical também têm algumas vantagens. Os componentes pesados como o gerador, a caixa multiplicadora de velocidades bem como o sistema de controlo podem ser facilmente instalados junto ao solo. A grande vantagem deste gerador é a capacidade de capturar o vento proveniente de qualquer direcção sem efectuar para isso qualquer ajuste de posicionamento [14].

A primeira máquina eólica deste tipo foi instalada nas ilhas de Magdalen. Com 37m por 24 m era capaz de produzir 230 kW. Esta instalação gerou um grande interesse nos produtores de energia. Por razões económicas decidiram construir turbinas eólicas de eixo vertical mais pequenas, 17m por 11m com uma potência de 50kW [15].

Existem dois principais tipos de rotor de eixo vertical: Savonius e Darrieus.

O rotor de Savonius é baseado no princípio desenvolvido por Flettner, que é formado por duas metades de um cilindro ao longo do plano central, passando por duas superfícies semi-cilíndricas laterais ao longo do plano de corte, semelhante a letra “S” [16].

O rotor de Darrieus usa duas ou três lâminas curvas, sendo ambas as extremidades das lâminas, presas a um eixo vertical. A turbina eólica tem um torque de partida baixa, mas pode fornecer uma boa eficiência a altas velocidades de rotação. Este tipo de rotor normalmente não é utilizado isoladamente, mas pode ser usado em conjunto com um rotor de vento, que fornece um alto torque de partida, como por exemplo o rotor Savonius [16].



Figura 2.9 Turbina Eixo Vertical.

2.9.2 Aerogerador de Eixo Horizontal

As turbinas eólicas de eixo horizontais são as mais comuns. Actualmente é natural ver aerogeradores deste tipo um pouco por todo lado. A principal razão que justifica este facto é uma eficiência maior na conversão de energia do que a dos aerogeradores baseados em turbinas eólicas de eixo vertical. Todavia este tipo de aerogerador precisa de mecanismo que permita a orientação do eixo do rotor em relação à direcção do vento. A necessidade destes mecanismos representa uma desvantagem face às turbinas eólicas de eixo vertical, mas permite usufruir de ventos mais fortes, adquirindo uma postura frontal das pás do rotor em relação à direcção do vento. Assim, possibilita eficiências mais elevadas.

Os rotores são habitualmente constituídos por 3 pás, tornando a sua estrutura mais estável e possibilitando a construção de aerogeradores com mais de 100m de altura, capazes de gerar potências na ordem dos 5MW ou mesmo 7MW. Porém, os rotores com 2 pás são mais eficientes, mas são mais instáveis e propensos a turbulências, trazendo risco acrescido à sua estrutura [17].

2.10 Composição do Aerogerador

Como os aerogeradores de eixo horizontal são os mais populares e modernos, irá proceder-se à identificação dos diversos componentes que os compõem e efectuar a descrição dos seus principais componentes. Além dos componentes indicados na Figura 2.10 Turbina de Eixo Horizontal, o sistema inclui ainda cabos eléctricos, protecções e equipamentos para apoio à operação e manutenção.

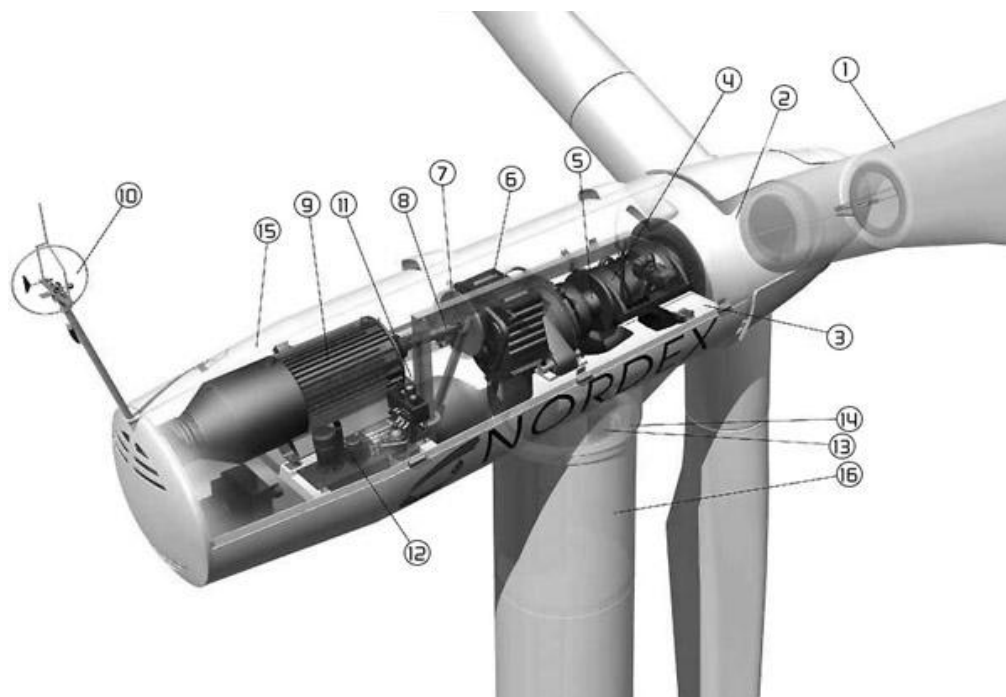


Figura 2.10 Turbina de Eixo Horizontal

1 - Pás do rotor; 2 - Cubo do rotor (Hub); 3 - Cabina; 4 - Rolamento do eixo das pás; 5 - Eixo do rotor; 6 - Caixa de velocidades; 7 - Travão de disco; 8 - Veio do gerador; 9 - Gerador; 10 - Anemómetro e sensor de direcção; 11 - Sistema de controlo; 12 - Sistema de rolamentos esféricos; 13 - Sistema de orientação direccional; 14 - Sistema hidráulico; 15 - Cobertura da cabina; 16 - Torre.

2.10.1 Pás, Cubo e Eixo

As pás são dos componentes mais importantes de um aerogerador, pois são elas que convertem a energia cinética do vento em energia mecânica. Os materiais de construção das pás devem ser o mais resistentes e leves possível, por forma a não tornar o aerogerador muito pesado. As pás também desempenham um papel importante no controlo da velocidade do eixo, como é o caso do controlo do ângulo de passo das pás e o controlo por perdas aerodinâmicas.

O cubo do rotor pode-se definir como a estrutura metálica onde são fixadas as pás e o eixo do rotor. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. Para os aerogeradores que utilizem o controlo de velocidade por passo, o cubo, além de apresentar

os rolamentos para fixação das pás, também acomoda os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque de todas as pás [18].

O eixo é o componente responsável pelo transporte de energia captada pelas pás até à caixa de velocidades ou até ao rotor do gerador no caso de estes se encontrarem no mesmo eixo.

Também é construído a partir de materiais com elevada resistência mecânica.

2.10.2 Caixa de Velocidades

A caixa de velocidades tem a finalidade de converter a velocidade de rotação do rotor para a velocidade de rotação do eixo do gerador, por forma a adaptar as velocidades com o intuito de manter o aerogerador a produzir energia.

É composta por eixos, engrenagens de transmissão e acoplamentos. A velocidade angular dos rotores situa-se geralmente entre a gama de 20 e 150 rpm, correspondente à velocidade angular das pás. A gama de velocidades angulares óptima de funcionamento dos geradores é mais elevada, situando-se normalmente entre as 1200 rpm e 1800 rpm, utilizando-se assim a caixa de velocidades para fazer a transmissão com a respectiva relação de multiplicação.

2.10.3 Gerador

O gerador é um dispositivo usado para converter energia mecânica de rotação em energia eléctrica. Estes podem ser de vários tipos: geradores síncronos, geradores assíncronos ou geradores de corrente contínua, também designados por dínamos.

2.10.4 Torre

As torres são estruturas rígidas destinadas para suportar não só a cabine como também as pás e todos os componentes do aerogerador, elevando o rotor até uma altura onde a velocidade do vento é maior, com menos perturbações (mais laminar) e com velocidade mais constante. As torres recentes podem atingir 100 m de altura pelo que devem ser bem dimensionadas para suportar todo o peso já referido.

A produção de torres é separada em dois tipos, as tubulares e as entrelaçadas. As tubulares são vulgarmente de aço, enquadrando-se relativamente bem na paisagem, ou então podem ser de betão. As entrelaçadas são mais baratas, suportando menos peso; porém causam um impacto visual mais acentuado pelo que são menos utilizadas.

2.11 Impacto Ambiental

Todas formas de produção de energia interagem com o meio ambiente, e isto é particularmente verdade no que respeita às energias renováveis. No entanto, o benefício deste tipo de energias é significativamente maior que o impacto causado no ambiente.

A exploração de energias renováveis é cada vez mais importante face às necessidades energéticas das sociedades [19].

2.11.1 Emissão de Ruído

Apesar da reconhecida vantagem das torres de geração eólica a sua instalação e exploração exibem alguns inconvenientes como é o caso da emissão de ruído. As principais fontes de ruído são provenientes da rotação das pás e da caixa multiplicadora.

A utilização de aerogeradores com caixa multiplicadora é cada vez mais frequente uma vez que esta proporciona um ajuste da velocidade de rotação do rotor. Isto é, para baixas rotações das pás, a velocidade do rotor é relativamente maior. As engrenagens da caixa geram vibrações que se propagam pela estrutura da torre emitindo algum ruído. O aerogerador de multipolos não utiliza caixa multiplicadora, sendo o eixo do rotor a sustentar as pás, dispensando o sistema de engrenagens, eliminando assim parte do ruído gerado. A própria rotação das pás é propícia de gerar ruído uma vez que estas oferecem uma certa resistência ao deslocamento do ar.

Geradores de maior dimensão por norma geram mais ruído. Todavia existem outras características a ter em conta como a sua localização espacial e as características topográficas dos terrenos envolventes. A localização e características do terreno estabelecem a capacidade do ruído se propagar em melhores ou piores condições.

A evolução tecnológica permite a construção de aerogeradores mais eficazes do ponto de vista energético bem como do ponto de vista de redução de ruído [20].

2.11.2 Impacto Visual

A energia eólica é uma das formas de exploração de energia mais limpa quer no que toca à emissão de gases quer quanto a outros tipos de poluição. As torres eólicas são regularmente instaladas em locais altos, atingem alturas consideráveis e consequentemente são visíveis a longas distâncias (dezenas de quilómetros). O impacto visual dos aerogeradores pode ser encarado de dois pontos de vista distintos: o primeiro como símbolo de energia não poluente e deste ponto de vista sendo uma mais-valia, ou como uma estrutura desenquadrada com a paisagem, podendo a sua presença ser considerada intrusiva [20]. As sombras em movimento e as reflexões intermitentes devido à incidência do sol nas pás são também efeitos incomodativos que podem ser superados com uma boa projecção do parque.

Se tivermos em conta que os primeiros aerogeradores eram suportados por estruturas semelhantes à dos postes que suportam as linhas de alta tensão, pode afirmar-se que as estruturas de suporte de aerogeradores têm sofrido desenvolvimentos notáveis ao nível do “design”.

2.11.3 Impacto Sobre a Fauna e Flora

A construção de parques eólicos poder por em causa a vida circundante na medida em que pode afectar a fauna e a flora. Um dos possíveis impactos que a localização dos parques eólicos pode ter sobre a fauna está relacionado com o facto de estes se encontrarem próximos de zonas de nidificação, repouso, alimentação e ou de rotas de migração de aves, gerando o risco constante de estas chocarem com as pás das torres eólicas.

A construção de parques também exerce um impacto negativo no que respeita à flora, não podendo existir vegetação volumosa na zona delimitada para o parque. Contudo a actividade agrícola pode subsistir em alguns casos [21]. O impacto provocado por este tipo de energia renovável é menor quando comparada com outras energias renováveis,

como é o caso da energia solar e energia hídrica. No caso da energia hídrica a construção de barragem tem um grande impacto estendendo-se por áreas significativas. A energia solar causa um impacto menor mas a potência que é possível retirar também é menor.

A solução para minimizar o impacto ambiental provocado pela construção de parques eólicos passa uma vez mais por um bom planeamento dos parques com vista a torna-los cada vez mais eficientes a todos os níveis.

2.12 Controlo de Potência

Ao longo dos últimos anos, o progresso da tecnologia tem levado ao desenvolvimento de turbinas eólicas de alta eficiência. Por razões económicas, grande parte do trabalho desenvolvido concentra-se em grandes turbinas eólicas, semelhantes à da Figura 2.10. Entre as tecnologias que permitem a construção deste tipo de máquinas, o controlo de potência desempenha um papel fundamental. As turbinas eólicas modernas são dotadas de sofisticado sistema de controlo, para funcionarem em vários modos, tais como, arranque, paragem e modo de produção de energia [22].

2.12.1 Controlo do Ângulo de Passo das Pás (Pitch Controlled)

As forças de sustentação e arrasto podem ser vistas como forças de impulso e torque aerodinâmico do rotor, podem ser controladas através do controlo de ângulos de ataque da interacção do vento com os elementos das lâminas. Os ângulos de ataque apropriados associados às características das lâminas podem controlar a velocidade de rotação do rotor. Uma estratégia que tem sido implementada num grande número de turbinas eólicas é variar o ângulo de inclinação das pás, de modo a regular a velocidade do gerador [22].

Este método contém um sistema de controlo mais preciso, em especial junto à potência máxima. Assim para velocidades de ventos superiores à nominal, o sistema procura o ângulo de ataque que permite a turbina eólica produzir somente à potência nominal [23].

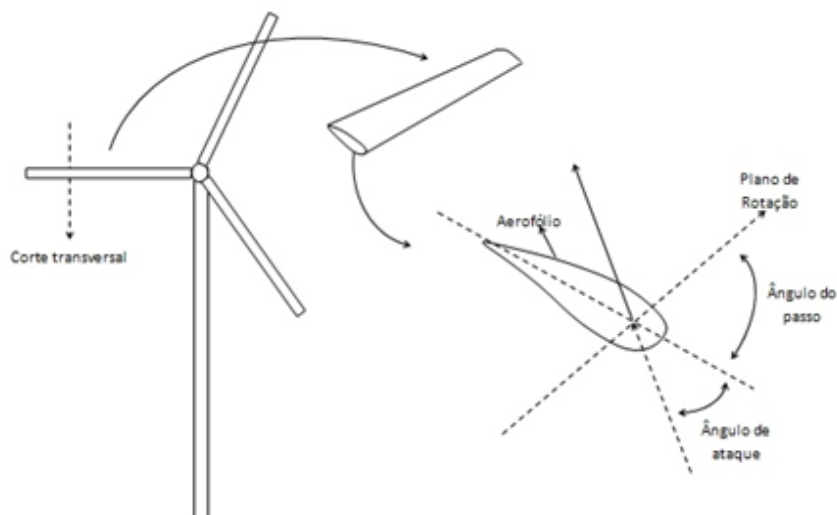


Figura 2.11 Ângulo de Passo de Ataque.

2.12.2 Controlo por Perda Aerodinâmica (Stall Regulation)

No controlo por perda aerodinâmica as lâminas são fixas ao contrário do que acontecia no controlo por ângulo de ataque. Este sistema de controlo é passivo e reage à velocidade do vento. Como às lâminas são fixas apresentam sempre o mesmo ângulo, perante este facto o ângulo de inclinação tem de ser escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores à nominal, a turbina eólica entre no controlo por perdas aerodinâmicas. Este controlo faz como que sejam diminuídas as forças de sustentação, aumentando as forças de arrasto, assim o aerogerador pode continuar a produzir à potência nominal para velocidades superiores.

Este sistema de controlo apresenta vantagens relativamente ao controlo por ângulo de passo das pás, tais como: ter uma estrutura no cubo do rotor mais simples, tornando o conjunto mais leve e a manutenção deste sistema é mais simples devido ao facto de não existirem peças móveis no sistema de controlo.

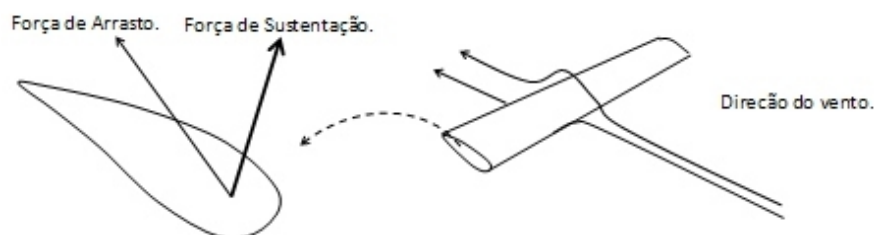


Figura 2.12 Forças de Arrasto e Sustentação.

2.12.3 Energy Harvesting

O conceito de *Energy Harvesting* refere-se frequentemente a pequenos dispositivos autónomos ou a micro captação de energia. Os sistemas de captação de energia, despertam actualmente um interesse muito significativo quer devido à crise energética quer devido às preocupações sobre questões ambientais. Têm com objectivo converter a energia directamente disponível do ambiente, tais como vibrações, radiação solar, vento ou gradiente de temperatura em energia eléctrica directamente utilizável [24]. Esta tecnologia oferece duas vantagens significativas, o que a torna apelativa como alternativa à utilização de baterias: baseia-se em fontes energéticas praticamente inesgotáveis e apresenta pouco ou nenhum efeito adverso a nível ambiental.

Até há poucos anos, a colheita de micro-energia foi considerada uma mera curiosidade científica. Mas o longo caminho percorrido pela comunidade de Ultra-Low-Power (ULP) veio a demonstrar que esta tecnologia apresenta resultados inesperados que empurram a captação de micro energia para fora dos laboratórios. Actualmente, os projectos de ULP estão a ser avaliados não apenas do lado do consumo, mas também a partir da perspectiva de produção [25].

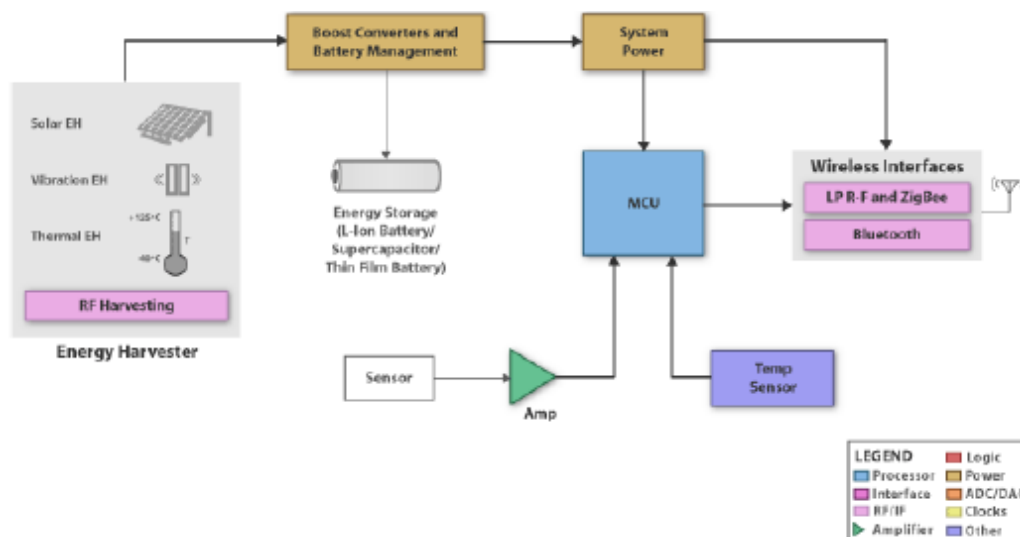


Figura 2.13 Diagrama de Blocos de uma Aplicação de Energy Harvesting, Texas Instruments [26].

No diagrama da Figura 2.13 é apresentado um exemplo de uma aplicação usando *Energy Harvesting*. A energia captada no módulo *Energy Harvesting* é na ordem dos miliwatts, e poder ser capturada através da energia da luz, vibrações ou energia térmica. Uma possível fonte de energia é também a obtida a partir de radiação de RF, tais como as emitidas a partir de torres de comunicações. A energia pode ser acondicionada em baterias, em eficientes condensadores de carga rápida ou em baterias de película fina recentemente desenvolvidas [26].

O módulo de *Energy Harvesting* é uma alternativa ao painel solar no que toca a alimentação do módulo autónomo de monitorização.

3 Desenvolvimento do Módulo Autónomo de Monitorização

3.1 Introdução

O desenvolvimento de um módulo autónomo de monitorização implica um estudo do estado da arte, por forma a perceber quais as variáveis que é necessário monitorizar para conhecer o comportamento do aerogerador em função das condições climáticas. Após a análise e consequente compreensão do conjunto de variáveis em causa, analisam-se quais as melhores soluções no que toca ao desempenho do sistema. Neste capítulo apresentam-se as várias etapas necessárias à implementação do sistema.

Este capítulo está dividido em quatro secções distintas. Na secção 3.2 descreve-se as características do aerogerador de referência a usar neste projecto e a localização do mesmo.

Na secção 3.3 apresentam-se os diferentes sensores utilizados de modo a ser possível a leitura das variáveis climáticas e das variáveis eléctricas do aerogerador. Em particular são descritos o sensor de velocidade de vento, o sensor de direcção do vento e o sensor de corrente.

A secção 3.4 ilustra detalhadamente a escolha efectuada relativamente aos componentes electrónicos mais apropriados e qual o modo de proceder à sua integração no sistema. Explicam-se ainda os aspectos tidos em conta na opção de cada componente e as vantagens e desvantagem dos mesmos para esta aplicação.

Por fim descreve-se o procedimento da implementação do software, as ferramentas usadas na comunicação do computador com o módulo de monitorização bem como a estrutura do software de suporte.

3.2 Características da Torre Eólica

O projecto descrito nesta dissertação consiste essencialmente no desenvolvimento de um sistema para a monitorização dos parâmetros de um mini/micro aerogerador. O aerogerador escolhido está localizado no campus universitário, localizado perto do IEETA (Instituto de Engenharia Electrónica e Telecomunicações de Aveiro), e foi instalado no âmbito do projecto Eolitor. Uma imagem do mesmo pode ser observado na Figura 3.1 Aerogerador de 20kW.. Este aerogerador é caracterizado por integrar um gerador multipolo de três fases de ímanes permanentes, ter uma potência nominal de 20kW alcançada com ventos na ordem dos 15m/s, atingindo tensões de saída que podem ir dos 360V a 420V, e velocidades óptima de rotação do rotor de 160 rpm, não possuindo caixa multiplicadora, nem controlo de *pitch* ou por perda aerodinâmica. Estes entre outros parâmetros característicos deste aerogerador podem ser consultados na Tabela 3.1. Pode-se também analisar a curva da potência fornecida pelo gerador em função do vento incidente nas suas pás, na Figura 3.2.



Figura 3.1 Aerogerador de 20kW.

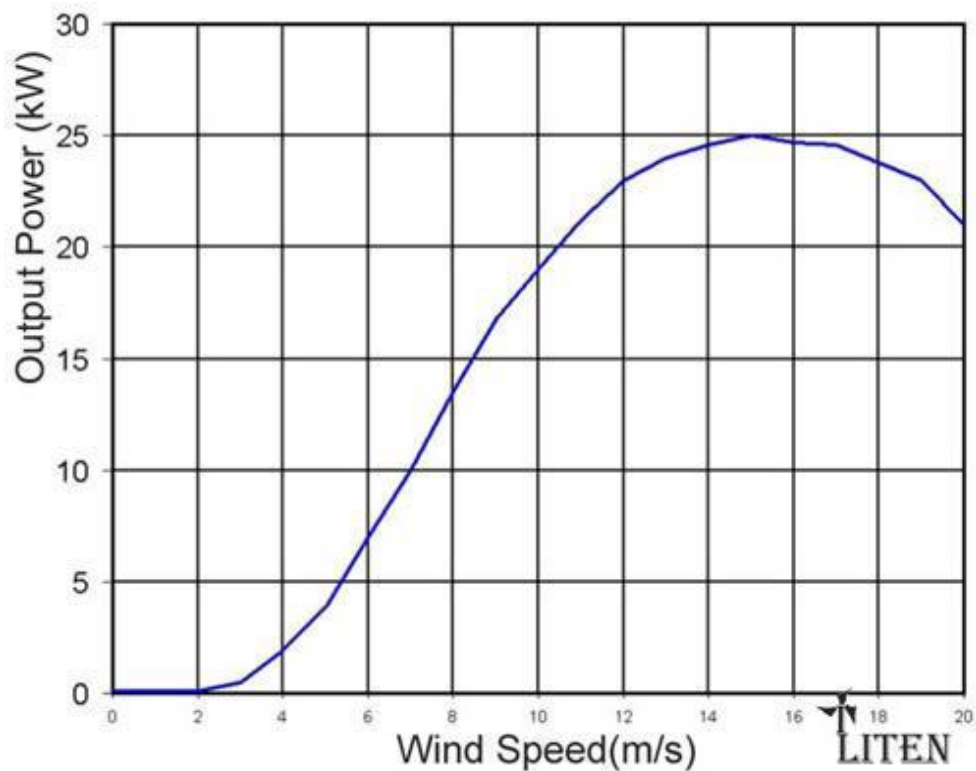


Figura 3.2 Desempenho do Aerogerador de 20kW [27].

Parâmetros	
Tipo	LT10.0-20kW
Gerador	Três fases, imanes permanentes
Tensão de saída	360V – 420V
Potência nominal	20 kW
Potência máxima	22 kW
Velocidade de vento inicial	2 m/s
Velocidade de vento nominal	12 m/s
Velocidade de vento máxima	25 m/s
Velocidade do rotor óptima	160 rpm
Número de Pás	3
Diâmetro de rotor	10 m
Largura da Pá	60 cm
Espessura da Pá	23 cm
Material das Pás	Fibra de vidro reforçado

Peso da turbina com as pás	525 kg
Transmissão	Não, transmissão directa
Controlo de Pitch	Não
Caixa de velocidades	Não
Protecção	Automática
Dimensões (altura)	12 m ou 18 m
Características	Slow-Mode, Brake

Tabela 3.1Características do gerador de 20kW.

O aumento da produção da energia é proporcional ao aumento da velocidade do vento. Este aerogerador procede automaticamente a uma travagem da rotação, para velocidade de vento demasiado forte para a produção de energia. O Liten 20kW é um gerador de média escala, projectado para uso doméstico mas também para ser comercializada a energia por ele disponibilizada [27].

3.3 Sensores

A medição dos parâmetros só é possível com o recurso a dispositivos capazes de converter uma determinada grandeza física numa relação que pode ser ou não ser linear. Estes dispositivos normalmente designam-se de sensores.

Alguns sensores respondem com sinal eléctrico a um estímulo e, nesse caso, podem ser chamados de transdutores.

3.3.1 Sensor de Velocidade do Vento (Anemómetro)

Um anemómetro consiste num instrumento para medir a velocidade do vento ou de outros fluidos em movimento. Geralmente possui um cata-vento para indicar a direcção do vento [28]. É essencial que estes instrumentos de medida estejam bem expostos a todas as direcções do vento, isto para que o resultado das medições não seja muito afectado pelos obstáculos em redor.

O modelo mais preciso é o tipo rotor horizontal de conchas (Anemómetro de Robinson) visível na Figura 3.3. Normalmente encontra-se montado um sensor de direcção de vento junto do anemómetro. Um rotor com três conchas hemisféricas que acciona um

mecanismo onde é instalado um sensor electrónico, normalmente óptico, cuja calibração é realizada num túnel de vento, e consiste em instalar o anemómetro na secção de teste e correlacionar as diferentes velocidades com a frequência de saída do anemómetro.

A vantagem deste sistema é que ele não depende da direcção do vento e, por conseguinte, de um dispositivo de alinhamento.

A principal desvantagem do anemómetro de copos reside no facto de a sua constante de tempo ser inversamente proporcional à velocidade do vento, isto é, aceleram mais rapidamente do que desaceleram [29].



Figura 3.3 Anemómetro de Três Copos

Outro tipo de sensor para medir a velocidade do vento é o anemómetro sónico, mais sofisticado, que recorre à medida do tempo de voo de ondas sonoras. Um anemómetro sónico consiste em pares emissores-receptores de som, ortogonalmente orientados. Cada par é capaz de detectar pequenas variações entre o instante da emissão e o da recepção de sinais sonoros. A velocidade de escoamento do ar é deduzida indirectamente, a partir das alterações que provoca na velocidade da propagação do som. A frequência de amostragem destes anemómetros é muito mais elevada do que os anemómetros de copos, cerca de 50Hz [30]. Estes já não têm a desvantagem da constante de tempo de desaceleração ser mais elevada do que a constante de tempo de aceleração presente nos anemómetros de copos.



Figura 3.4 Anemómetro Sónico

Devido ao baixo custo e baixo consumo que se pretende para o sistema de monitorização a desenvolver, a opção do anemómetro sónico não é a mais indicada para o projecto, visto implicar um custo maior relativamente ao anemómetro de três copos. Desta forma procedeu-se à escolha do anemómetro de três copos, semelhante ao da Figura 3.3. Os sensores são normalmente instalados na parte superior do gerador. O dispositivo seleccionado opera para níveis de tensão de alimentação que podem variar desde 1.8V até 5 V, tendo-se optado por uma tensão de alimentação de 3.3V o que implica um consumo de corrente em regime estacionário da ordem dos 4 a 5mA. O sinal de saída tem a forma de uma onda quadrada (aproximadamente de 3.3V ou 0V) fornecida por um sensor óptico que detecta a presença ou ausência, das saliências de uma roda dentada durante o movimento de rotação do eixo ao qual estão acopladas os três copos. A frequência associada à onda de saída é directamente proporcional à velocidade do vento.

A solução encontrada para efectuar a medida deste sensor consiste em ligar o sinal de saída do sensor a uma linha de interrupção do microcontrolador utilizado e proceder à contagem do número de interrupções geradas pelo sensor durante um período de tempo conhecido.

Através da equação 3.1 é possível chegar a um valor da velocidade do vento em [m/s].

$$v = \frac{n}{N \times T} 2\pi r \quad \text{Equação 3.1}$$

onde:

v = velocidade do vento [m/s],

n = número de interrupções contadas,

T = ao tempo que a interrupção está a contar [s] = 1s,

N = número de dentes por volta = 16,

r = raio do anemómetro em metros = 0.155m.

3.3.2 Sensor de Direcção do Vento

Para efectuar uma caracterização correcta e completa do vento é fundamental conhecer a sua velocidade bem como a sua direcção. Este sensor também se encontra instalado na cabina da torre eólica. A direcção obtida é, contudo, relativa, uma vez que a base onde está montado é móvel.

O sensor incorpora um potenciómetro polarizado com uma tensão de 3.3V, consumindo uma corrente de 1mA. O sinal de saída é proporcional ao valor da resistência do potenciómetro e consequentemente à direcção do vento.

Como o sinal de saída do sensor de direcção de vento é contínuo e em tensão, este é facilmente lido pelo microcontrolador usando um canal da ADC deste último. Sabendo-se que o potenciómetro é linear, então o sinal de saída varia de 0V a 3.3V e o valor de ADC (10 bits) varia entre 0 e 1023 respectivamente. A equação 3.2 indica o valor lido pela ADC em tensão.

$$V = \frac{ADC}{1023} \times V_{DD} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde:

V = valor em tensão [V],

ADC = valor digital da ADC ,

V_{DD} = tensão de alimentação [v] = 3.3V.

3.3.3 Sensor de Corrente

Em sistemas de accionamento eléctrico, uma das grandezas que precisa ser monitorizada ou controlada é a corrente eléctrica. Existem vários métodos para medir esta corrente, como por exemplo, sensores utilizando o efeito de Hall, sensores de indução e o uso de resistências. Tanto a resistência como os sensores de corrente são dispositivos que detectam a corrente eléctrica (AC ou DC) existente num fio condutor.

O método de medir a corrente eléctrica utilizando uma resistência é mais frequente em baixas correntes e em situações em que a queda de tensão nesse elemento não seja crítica. Este método é bastante simples na medida em que consiste simplesmente em colocar uma resistência em série com o fio condutor. Sabendo o valor da resistência e medindo o valor da tensão aos seus terminais, usando a lei de Ohm é fácil de calcular a corrente que atravessa o condutor. Contudo tem que se ter em especial atenção a potência dissipada nessa resistência.

Os sensores de corrente utilizando o efeito de Hall, caracterizam-se basicamente pelo aparecimento de um campo eléctrico transversal em um condutor percorrido por uma corrente eléctrica, quando o mesmo se encontra mergulhado num campo magnético [31]. Estes sensores são capazes de medir correntes com frequências variáveis desde zero Hertz (Corrente Contínua) até correntes com frequência da ordem de centenas de kHz. Esses dispositivos são, em contrapartida, comparativamente mais caros, o que pode, em algumas situações, inviabilizar o objectivo de baixo custo de um projecto. Uma outra alternativa é o sensor baseado no efeito da indução electromagnética, que utiliza apenas um circuito do tipo toroidal com uma bobina exploratória, onde são induzidas tensões proporcionais à amplitude e à frequência da corrente que se deseja medir. Ou seja, esse sensor funciona seguindo os conceitos de funcionamento de um indutor. O indutor é um componente electrónico composto por um núcleo (normalmente ferromagnético) em torno do qual é colocado uma bobina. Quando uma corrente percorre esta bobina um campo magnético é formado concentrando-se no centro do núcleo, fazendo com que se armazene energia por algum tempo [32].

Estes sensores são de construção bastante simples e, portanto de custo bastante acessível. Apresentam, porém, o inconveniente de produzir um valor de saída que depende da frequência da corrente, o que pode não ser desejável ou inviabilizar mesmo o seu uso no caso da medida de correntes contínuas.

O sensor L01Z050S05 da Tamura foi seleccionado para esta aplicação visto ser um sensor de corrente usando o efeito de Hall. Este sensor é alimentado a 5V consumindo uma corrente aproximadamente de 15mA. É caracterizado principalmente por uma excelente precisão e linearidade, uma banda larga de resposta em frequência, uma elevada imunidade a interferências externas, um bom tempo de resposta e capacidade de sobrecarga.



Figura 3.5 Sensor de Corrente Efeito de Hall [33]

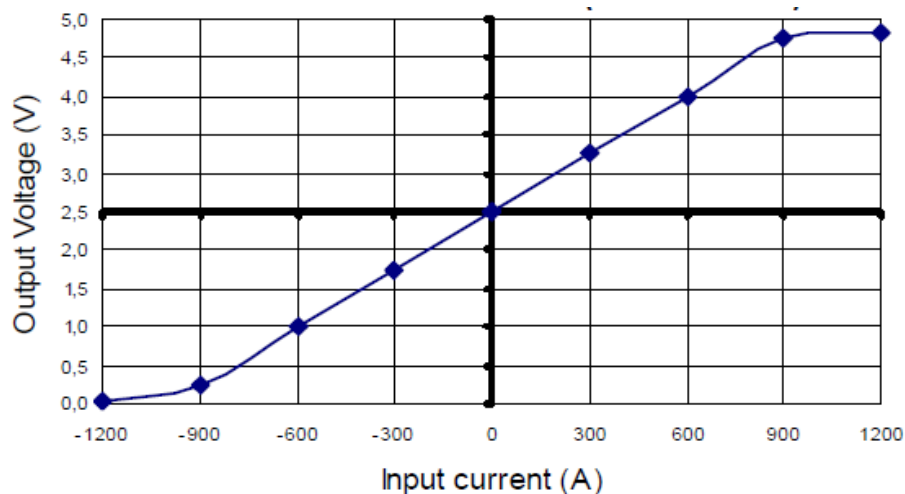


Figura 3.6 Curva Característica do Sensor [33].

A Figura 3.6 representa a curva característica do sensor L01Z600S05 que permite ler valores numa gama entre 0A a 600A. Analogamente o sensor L01Z0505S05 permite ler valores numa gama de 0A a 50A e suporta uma corrente máxima de 62,5A, ou seja, mais 25% do que a corrente de referência. Como é visível na Figura 3.6o sinal de saída varia de 0V a 5V, sendo portanto superior à gama da ADC do microcontrolador utilizado, e consequentemente não pode ser ligado directamente ao canal da ADC. Uma solução possível é utilizar um divisor resistivo com $R_1=470\Omega$ e $R_2 = 820\Omega$, daria uma tensão à entrada da ADC entre 0V e 3.2V aproveitando melhor a gama disponibilizada por esta. Para obter o valor da corrente lido através do sensor com base no valor lido pela ADC, calcula-se o valor da corrente com o auxílio da Figura 3.6a partir da equação

$$V_{ADC} = \frac{ADC}{1023} \times \frac{R_1 + R_2}{R_2} \times V_{DD} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

V_{ADC} = valor da ADC em tensão [V],

ADC = valor digital da ADC,

V_{DD} = tensão de alimentação [V] = 3.3V

R_1 e R_2 = resistências do divisor resistivo = 10k Ω .

É ainda preciso calcular o declive da recta da Figura 3.6, para utiliza-se os pontos;
 $P_1(0 ; 2,5)$ e $P_2(50 ; 4)$.

$$m = \frac{4 - 2,5}{50 - 0} = 0.03 \quad \text{Equação 3.4}$$

O valor da corrente, por sua vez, é expresso pela Equação 3.5

$$I = \frac{V_{ADC} - b}{m} \quad \text{Equação 3.5}$$

onde:

I = corrente lida [A],

b = ordenada na origem [V] = 2.5V,

V_{ADC} = valor da ADC em tensão [V].

3.4 Arquitectura do Hardware

A arquitectura do Hardware é concebida de forma a garantir uma correcta funcionalidade do sistema. Para tal foi necessário proceder à concepção e projecto de circuitos capazes de satisfazerem as necessidades dos objectivos propostos. Um diagrama de blocos da arquitectura pode ser vista na Figura 3.7.

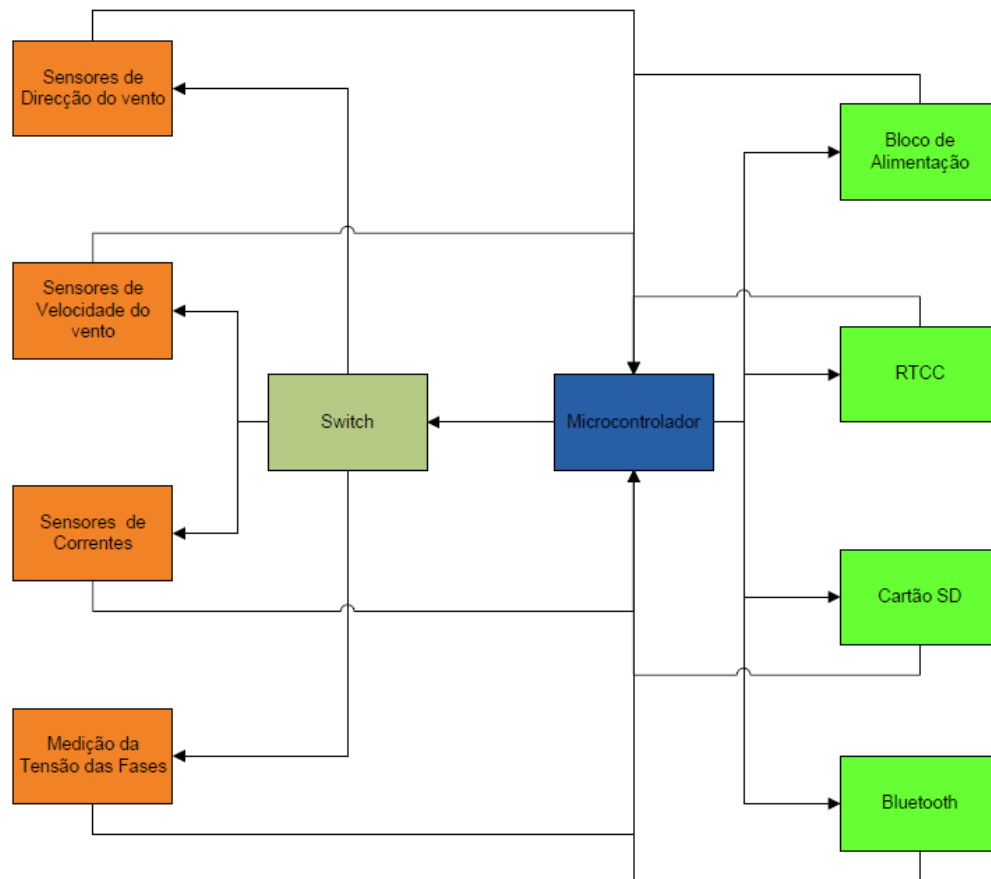


Figura 3.7 Diagrama de Blocos do Hardware

3.4.1 Alimentação

A Figura 3.8 apresenta um diagrama geral da alimentação da placa de monitorização bem como o método de monitorização da tensão de alimentação e ainda o modo de funcionamento do carregador de baterias.

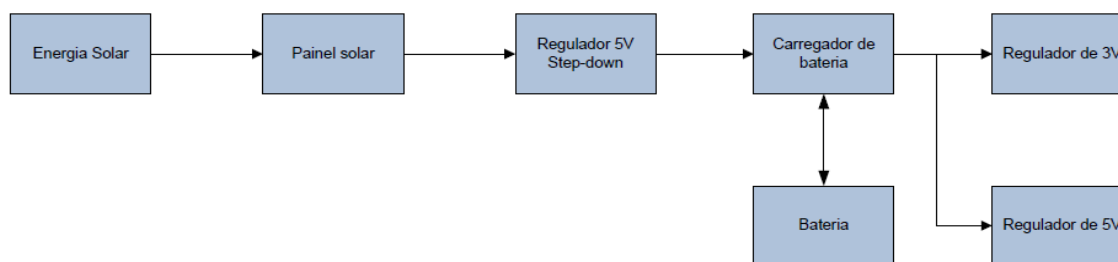


Figura 3.8 Diagrama de Blocos da Alimentação

Dispositivos	Corrente consumida	Tensão de alimentação
Bloco de alimentação com a energia proveniente do sol	15mA	---
Bloco de alimentação com a energia proveniente da bateria	10mA	---
Microcontrolador	$\approx 1\text{mA}$	3.3V
Sensor de corrente	$\approx 15\text{mA}$	5V
Sensor de velocidade do vento	$\approx 4\text{mA}$	3.3V
Sensor de direcção do vento	$\approx 1.8\text{mA}$	3.3V
Bloco medidor de tensão	$\approx 60\text{mA}$	5V
Bluetooth	$\approx 15\text{mA}$	3.3V
Cartão de memória	$\approx 15\text{mA}$	3.3V
Switch Analógico	$\approx 10\mu\text{A}$	5V

Tabela 3.2 Consumo Energético dos Dispositivos

3.4.1.1 Painel Solar

Como fonte primária de energia, o sol oferece algumas vantagens impressionantes, quando aproveitadas por um módulo de células solares. O sol gera energia virtualmente ilimitada, e espera-se que possa durar por mais cinco biliões de anos. Assim, as células solares são um meio prático para converter energia solar em energia eléctrica. A quantidade de corrente de saída tem uma relação directamente proporcionalidade à energia da luz incidente na célula solar. As células dos painéis solares são ligadas geralmente em série ou em paralelo, combinação que proporciona vários amperes de corrente a uma determinada tensão.

Uma vez que um dos requisitos deste trabalho era o de desenvolver uma unidade de monitorização capaz de funcionamento autónomo (i.e. sem necessidade de uma fonte de energia eléctrica primária) foi escolhido, com fonte primária, um painel capaz de satisfazer as necessidades energéticas do sistema, sendo esta a única maneira de obter energia para manter o sistema funcional em regime contínuo. O painel seleccionado para o efeito, é um painel de 5W (Figura 3.9).



Figura 3.9 Painel Solar 5W [34].

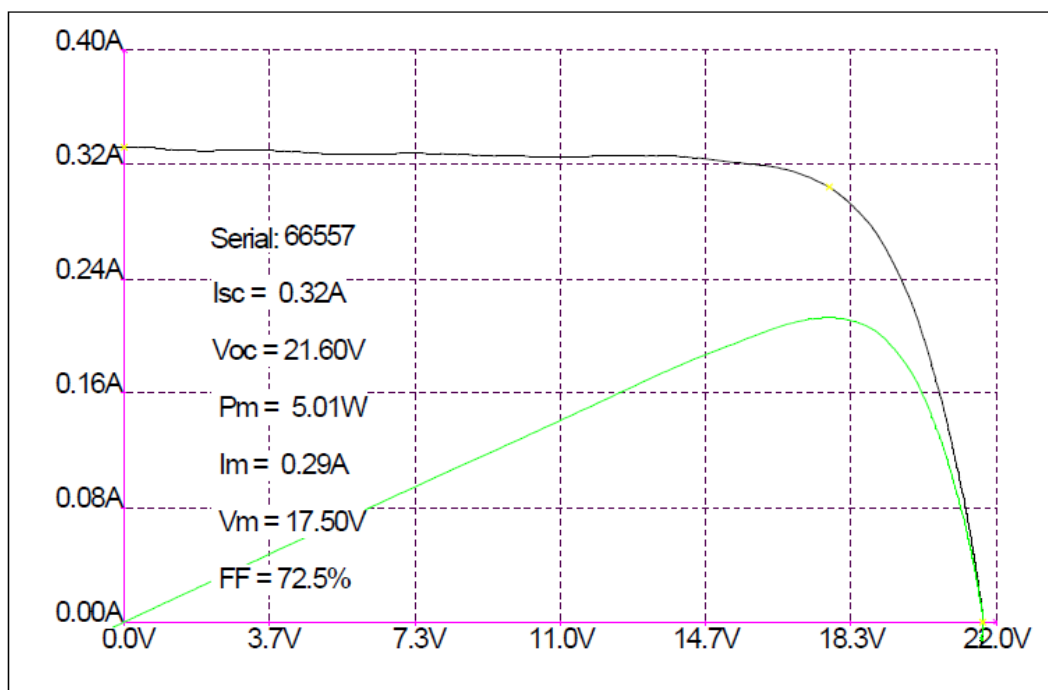


Figura 3.10 Curva Característica do Painel Solar [35].

Na Figura 3.10 pode observar-se a curva característica do painel solar que descreve o comportamento da corrente de saída em função da tensão. Este painel pode fornecer uma corrente máxima de 320mA para tensões não superiores a 15V, podendo o mesmo atingir uma tensão de 21.6V em circuito aberto. A variação da intensidade da luz solar vai ter um efeito menor na tensão em circuito aberto, mas por outro lado tem um efeito directo sobre a corrente máxima que é possível extrair. Esta característica é fundamental na concepção dos circuitos electrónicos.

O desempenho ilustrado na curva característica é geralmente medido para condições ideais, nomeadamente o painel encontrar-se exposto à luz solar na linha do equador e a determinadas temperaturas, uma vez que a temperatura é um factor determinante.

3.4.1.2 Regulador de Tensão de 5V Step-Down

O regulador de tensão foi utilizado com o objectivo de poder alimentar o sistema, a partir de um painel solar ou, em alternativa, a partir de uma fonte de tensão em laboratório. Este regulador mantém estabilizada a tensão de saída em 5V, independente das tensões de entrada, desde que estas sejam suficientes para colocar o regulador em funcionamento.

O regulador seleccionado foi o TL2575-05 da Texas Instruments. É um regulador step-down (Buck), que proporciona todas as funções necessárias de um regulador deste tipo. Aceitando uma ampla gama de tensões de entrada de 4.75V até 42V, disponibilizando 5V de tensão de saída estável, sendo também possível ajustar o valor da mesma. Tem ainda como uma das suas principais características, capacidade para fornecer até 1A, oferecendo igualmente um compensador de frequência interno, um oscilador de frequência fixa, e um pino externo ON/OFF que permite ligar e desligar o dispositivo. Devido à sua alta eficiência (cerca de 88%), reduz significativamente o tamanho do dissipador de calor, sendo em muitos casos dispensada a sua utilização, operando numa gama de temperatura de -40°C a 125°C.

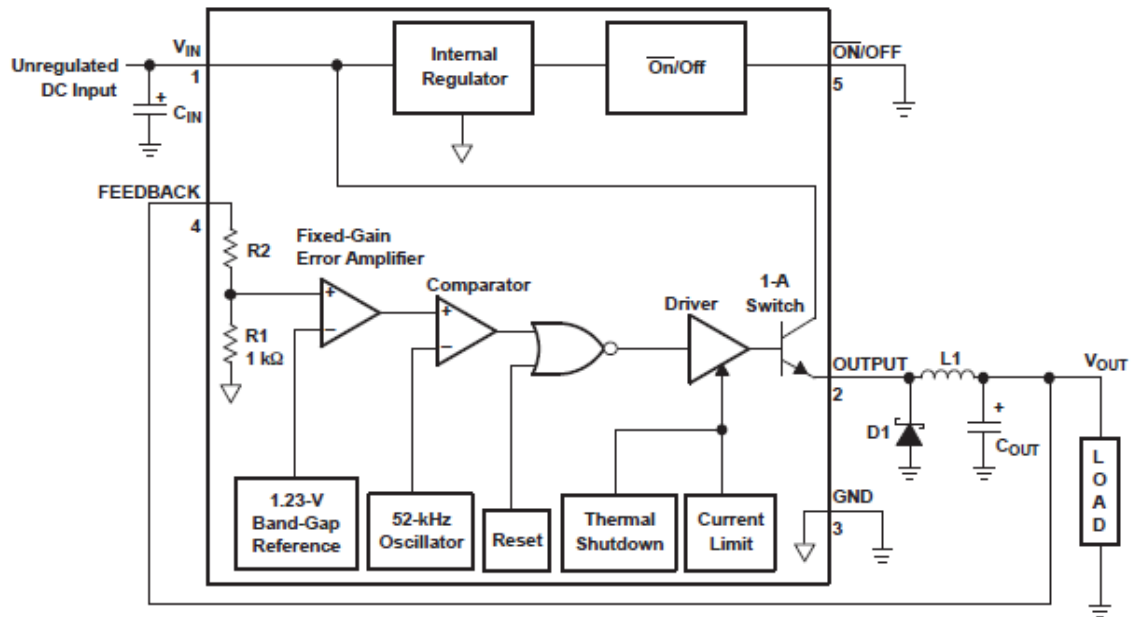


Figura 3.11 Diagrama de Blocos do TL2575-05 [36]

Este dispositivo só necessita de 4 componentes adicionais para funcionar correctamente, que são: um condensador de entrada, um condensador de saída, uma bobine e um díodo.

3.4.1.3 Regulador de Tensão de 3V e 5V

Neste caso foram empregues dois reguladores da família TPS6300x da Texas Instruments, o TPS63001 que proporciona uma tensão de saída de 3V e o TPS63002 que disponibiliza aos seus terminais uma tensão 5V. Estes reguladores têm como objectivo fornecer energia para alimentar todo o circuito de monitorização, sensores, sistema de armazenamento de dados, comunicação sem fios, switch analógico, relógio externo e amplificadores.

Este tipo de regulador possui uma característica muito própria, uma vez que pode funcionar como BUCK ou como BOOST, utilizando para o efeito uma única bobine. O dispositivo é ideal para uma aplicação deste tipo, uma vez que o circuito de alimentação, dependendo das condições de exposição solar, irá buscar energia em alternativa à bateria ou ao painel solar.

Este tipo de componente é caracterizado também por ter uma eficiência de 96%, capacidade para efectuar uma transição automática entre o modo Setp Down e o modo Step

Up, suportando ainda um intervalo de tensão de entrada entre 1.8V e 5.5V. O valor de tensão de saída pode ser fixa ou ajustável consoante a opção escolhida, sendo capaz de fornecer no máximo uma corrente de 1800mA. A estas características junta-se o facto de apresentar dimensões muito pequenas (3mm x 3mm).

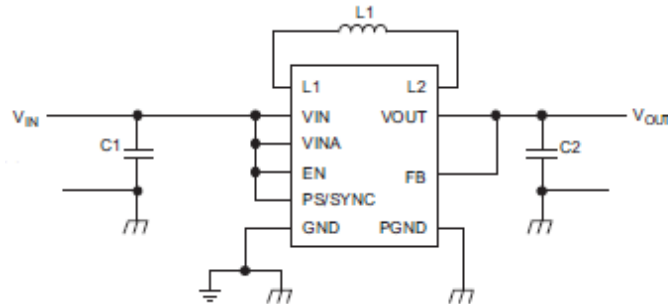


Figura 3.12 Esquema do TPS6300x [37]

Na Figura 3.122 é apresentado o esquema do TPS63001 e do TPS63002. Ambos possuem o pino de feedback (FB) ligado directamente à tensão de saída, o que só é possível porque ambos apresentam, para esta aplicação, uma saída de tensão fixa. Contudo, foi necessário calcular o valor da bobine e dos condensadores, para o que se utilizou as seguintes equações:

- Equações para o cálculo da Bobine L

$$L_1 = \frac{V_{OUT} \times (V_{IN1} - V_{OUT})}{V_{IN1} \times f \times 0.3A} \quad \text{Equação 3.6}$$

$$L_2 = \frac{V_{IN2} \times (V_{OUT} - V_{IN2})}{V_{OUT} \times f \times 0.3A} \quad \text{Equação 3.7}$$

onde:

L_1 = valor da bobine para o BUCK

L_2 = valor da bobine para o BOOST

V_{OUT} = tensão de saída

V_{IN1} = tensão máximo de entrada

V_{IN2} = tensão mínimo de entrada

f = frequência de oscilação

- Equação para o cálculo do condensador de saída

$$C_{OUT} = 5 \times L \times \frac{\mu F}{\mu H} \quad \text{Equação 3.8}$$

O valor recomendado para o condensador de entrada é superior a 4.7μF. O valor do condensador de saída é no mínimo igual ao calculado na equação 3.8, sendo L é o valor da bobine.

No que diz respeito ao calculo da bobine, este é distinto dependendo do regulador em questão. No caso do TPS63001 os cálculos já estão feitos no datasheet para uma tensão de saída é de 3.3V, tensão mínima de entrada de 2.5V e uma tensão máxima de entrada de 4.2V. Para este caso, a bobine escolhida é 2.2μH, uma vez que o valor recomendado pode encontrar-se entre 1.5μH a 4.7μH.

No caso do regulador de 5V, só se aplica a equação 3.7 uma vez que a equação 3.6 não faz qualquer sentido dado que resulta num valor negativo para a bobine. Consequentemente, para valores de tensões de entrada entre 2.5V e 4.2V e uma frequência de 1500kHz, o valor da bobine é no mínimo de 2.78μH. O valor escolhido foi de 4.7μH.

3.4.1.4 Carregador de Baterias

Como o sistema de monitorização inclui uma bateria para fornecer energia quando o painel solar não conseguir gerar essa mesma energia, é necessário um dispositivo que controle todo o processo de carga e que consiga fazer uma transição rápida da fonte geradora de energia para o sistema. Devido a esta necessidade realizou-se a uma pesquisa de circuitos integrados deste género, recorrendo a alguns fabricantes como sejam a Analog Devices, a ST, a Maxim ou a Texas Instruments, entre outros. O carregador escolhido foi o modelo BQ24074 da Texas Instruments que apresenta as seguintes características:

- Totalmente compatível com o carregador USB;
- Selecção entre 100mA e 5mA de corrente de entrada;
- Suporta até 28V de entrada e tem protecção contra sobre tensões;
- Integra uma gestão dinâmica de encaminhamento da energia;
- Suporta até 1.5A de corrente de saída;
- Programa de pré-carga e de carga rápida;

- Protecção contra correntes inversas curto-circuito;
- Indicação dos estados da bateria; em carregamento, carregamento completo ou em bom estado de carga.

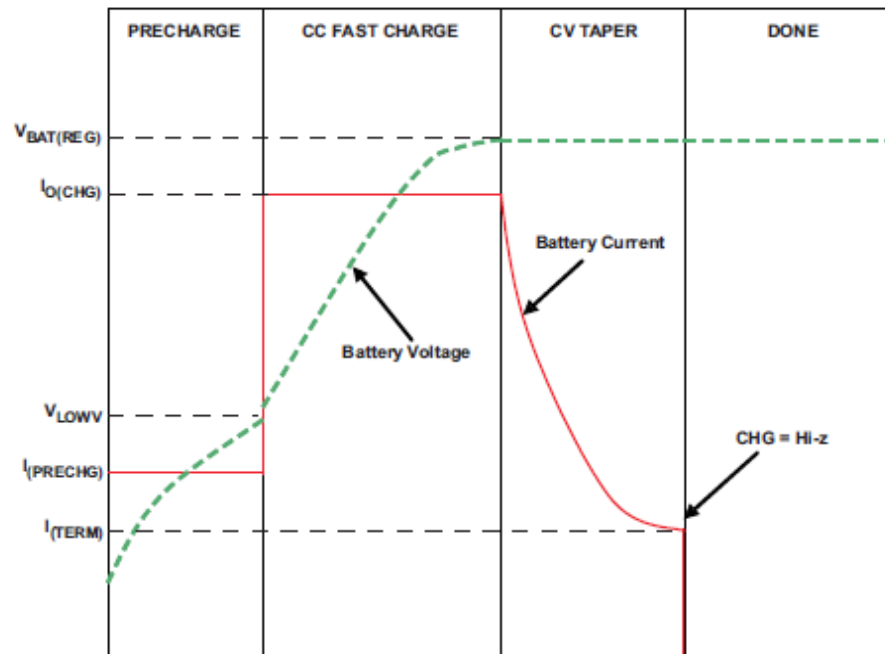


Figura 3.13 Ciclo de Carga Típico [38]

Na Figura 3.133 são apresentadas as três fases de carga de uma bateria: pré-carga, carga rápida e estabilização da carga da bateria. A fase de pré-carga é utilizada quando a bateria apresenta um nível de tensão muito baixo. Esta fase carrega a bateria até cruzar o limiar de tensão de V_{LOWV} , passando seguidamente para a fase de carga rápida. Aqui, o carregador vai fornecer uma corrente mais elevada, que depende da capacidade da bateria a carregar e pode ser programada, até atingir a tensão de bateria (V_{BAT}). Nesse instante, o processo de carregamento comuta para a fase de carregamento da bateria a tensão constante, e a corrente de carga vai diminuir exponencialmente. Os valores dos componentes utilizados são os recomendados no Datasheet do BQ24074.

3.4.1.5 Bateria

Este trabalho tem como objectivo, como já anteriormente referido, desenvolver um módulo autónomo de monitorização. Nesse sentido surge a necessidade de acrescentar um dispositivo de armazenamento de energia. Este dispositivo tem o papel importante no que

toca ao correcto e continuo funcionamento do sistema, na medida em que será ele a disponibilizar energia para o sistema na ausência de luz solar.

De modo a responder a esta exigência do sistema foi efectuada a escolha de uma bateria de suporte. O processo de selecção da bateria teve em conta vários aspectos no que respeita às características da bateria, assim como ao consumo energético do sistema. A poupança de energia foi uma das preocupações no dimensionamento do módulo, visto que quanto menos energia for desperdiçada pelo sistema, maior será a durabilidade da energia armazenada na bateria e consequentemente a autonomia do sistema.

Na escolha da bateria a utilizar foi tido em conta o consumo de energia do sistema. Neste existem dispositivos permanentemente alimentados, como é o caso do microcontrolador e bloco de alimentação, enquanto outros que são pontualmente alimentados, como é caso dos sensores. Os dispositivos que estão permanentemente ligados consomem cerca de 11mA. A estes junta-se o consumo pontual de cerca de 60mA na leitura dos valores dos sensores. O consumo de energia torna-se mais crítico quando o módulo de monitorização opera em modo online, visto que o módulo Bluetooth está constantemente ligado e adiciona um consumo de 15mA.

A equação 3.9 efectua um cálculo ponderado da corrente consumida pelo módulo autónomo monitorização e pelos respectivos sensores.

$$Corrente = \frac{1,5s * 30mA + 8,5s * 11mA}{10s} \approx 13,85mA \quad \text{Equação 3.9}$$

As características da bateria de Lithium seleccionada são: capacidade de 1080mAh disponibilizando uma tensão de 3.7V aos seus terminais. Se o sistema não estiver a operar em modo online e a bateria estiver totalmente carregada o sistema tem autonomia para setenta e oito horas ($1080/13.85=78$ horas), o que corresponde a três dias e seis horas na total ausência de luz solar.

3.4.2 Microcontrolador

Para implementar os vários sensores num sistema de monitorização local é necessária a utilização de uma unidade de processamento que permita a aquisição do valor

dos sensores e o processamento dos mesmos. A escolha do microcontrolador está implicitamente ligada à escolha do compilador e do programador. Nesse sentido, a escolha recaiu pela utilização de um microcontrolador da Microchip, devido a estes serem os mais utilizados nos projectos desenvolvidos na âmbito do IEETA, e por existirem, consequentemente, programadores e compiladores da Microchip disponíveis. A gama de microcontroladores da Microchip de 8,16 e 24 bits é muito ampla.

A escolha recaiu sobre a utilização de um PIC24FJ128GA006, visto ser um microcontrolador que integra timers de 16 bits com a possibilidade de operarem em 32 bits se necessário, incorporando um cristal de 8 MHz, com 4x PLL, comunicação série I2C (Inter-Integrated Circuit) e SPI (Serial Peripheral Interface), duas portas UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), vários portos I/O Digitais de vários bits e gestão de interrupções a partir de múltiplas fontes. Contudo as características mais importantes que levaram à escolha específica deste microcontrolador, foram a sua ADC de 10 bits com 16 canais de entrada e a capacidade de memória para alojamento de programas. Esta característica é importante uma vez que o sistema de monitorização inclui um cartão μ SD relativamente ao qual é necessário instanciar o código necessário à criação de um sistema de ficheiros, e o facto de integrar igualmente um RTCC (Real Time Clock and Calendar).

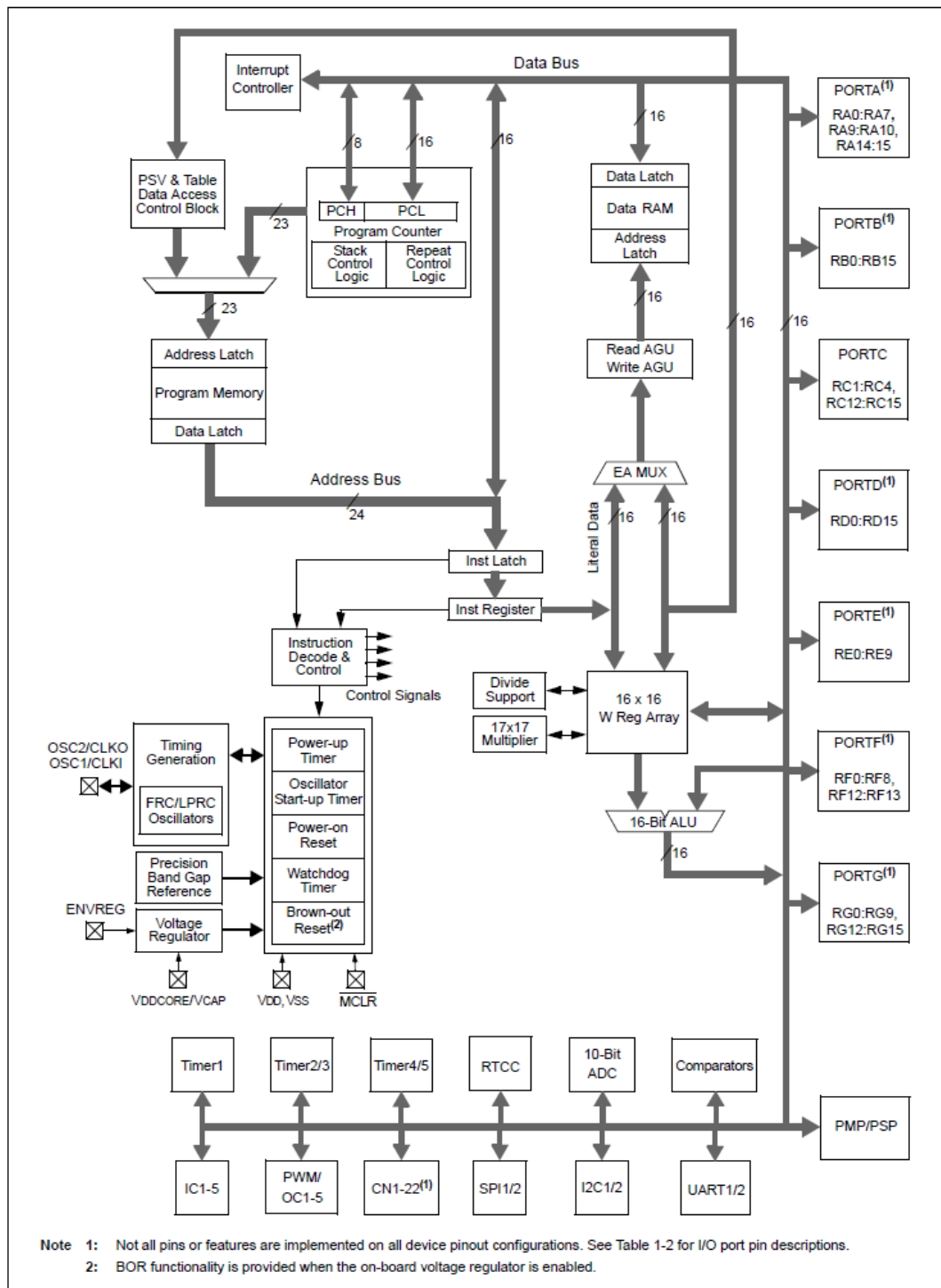


Figura 3.14 Diagrama de Blocos da PIC24FJ128GA006 [39]

3.4.3 Ligação Wireless

A ligação wireless é um meio comunicação sem fios, que permite transmitir dados do sistema de monitorização para outro dispositivo externo. As redes sem fio fornecem uma série de vantagens sobre as redes convencionais, já que não estão limitadas pelo uso de cabos, o que lhes concede uma maior mobilidade e liberdade de localização. No mercado existem vários tipos de tecnologias que podem ser usadas para realizar esta comunicação. De entre elas estudou-se a aplicabilidade da ligação por Bluetooth e a ligação por ZigBee. Estas tecnologias têm muito em comum: ambas são do tipo IEEE 802.15, e ambas operam na banda de frequência de 2.4GHz. O ZigBee é uma tecnologia mais recente comparativamente com o Bluetooth, e tem a vantagem de consumir menos energia para um mesmo alcance de comunicação. O Bluetooth, por outro lado, proporciona a ligação entre dispositivos muito variados como sejam computadores, telemóveis, câmaras digitais, auto-rádios, impressoras, entre muitos outros. A compatibilidade com estes dispositivos é uma grande vantagem para o Bluetooth.

Tendo em conta as vantagens e desvantagem de ambas as tecnologias e a aplicação para este projecto, a tecnologia seleccionada foi o Bluetooth, visto que é a mais vantajosa para aplicações como sejam a sincronização de dados com computadores, telemóveis e/ou PDAs. Outra das razões que conduziu a esta opção foi o facto de já existirem módulos de Bluetooth no laboratório do IEETA permitindo uma fácil interligação entre o módulo de monitorização e um computador externo.

O módulo escolhido foi F2M03GLA da Free2move, tendo como características mais relevantes, baixo consumo de energia, compatibilidade com dispositivos Bluetooth para comunicação de dados e voz, alcance até 350m (em linha de vista) e a exigência de poucos componentes externos. O F2M03GLA vem ainda com uma antena interna de alto rendimento o que, combinado com o baixo consumo de energia, faz deste módulo o dispositivo ideal para aplicações portáteis alimentadas a baterias. A comunicação deste módulo com o microcontrolador é efectuada através de uma ligação série do tipo UART.



Figura 3.15 Módulo Bluetooth [40]

3.4.4 Módulo de Armazenamento de Dados

Uma vez que o sistema a desenvolver pretende ser autónomo e passível de ser instalado em localizações remotas e de difícil acesso, tem como um dos seus principais requisitos a capacidade de armazenar, durante longos períodos de tempo, os valores lidos dos diversos sensores. Assim foi realizada uma pesquisa a fim de apurar o melhor dispositivo de armazenamento de dados local, o que foi de encontro a duas soluções possíveis:

A primeira solução recaiu na análise sobre a integração de um módulo de escrita e leitura de um cartão flash SD/MMC. Entre outras, esta solução apresenta como principal vantagem a possibilidade do cartão poder ser retirado e poder ser lido por qualquer dispositivo apropriado. Normalmente estes cartões contêm uma grande capacidade de armazenamento de dados. Contudo apresenta a desvantagem de uma maior complexidade do projecto e do software, pela necessidade de implementação de um sistema de ficheiros FAT32.

A segunda solução consiste em embutir no sistema uma memória flash usando o SPI para comunicar. A vantagem mais significativa desta solução era sua fácil integração na placa de circuito impresso. As desvantagens associadas a esta solução são um maior custo em relação a capacidade de armazenamento e o facto de a informação ser armazenada na forma de páginas.

Optou-se assim por adoptar a primeira solução, uma vez que a capacidade de armazenamento é bastante maior para um mesmo custo de aplicação e satisfaz em pleno os requisitos do projecto. O cartão SD é controlado pelo microcontrolador através do protocolo SPI. Para poder ser utilizado implica contudo o desenvolvimento, em software, de um sistema de ficheiros capaz de aceder ao cartão. Este sistema de ficheiros é

apropriado para manipular o cartão, possibilitando a criação de ficheiro caso eles não existam, abertura, escrita e leitura dos mesmos ou a criação de novos directórios, entre outras operações.

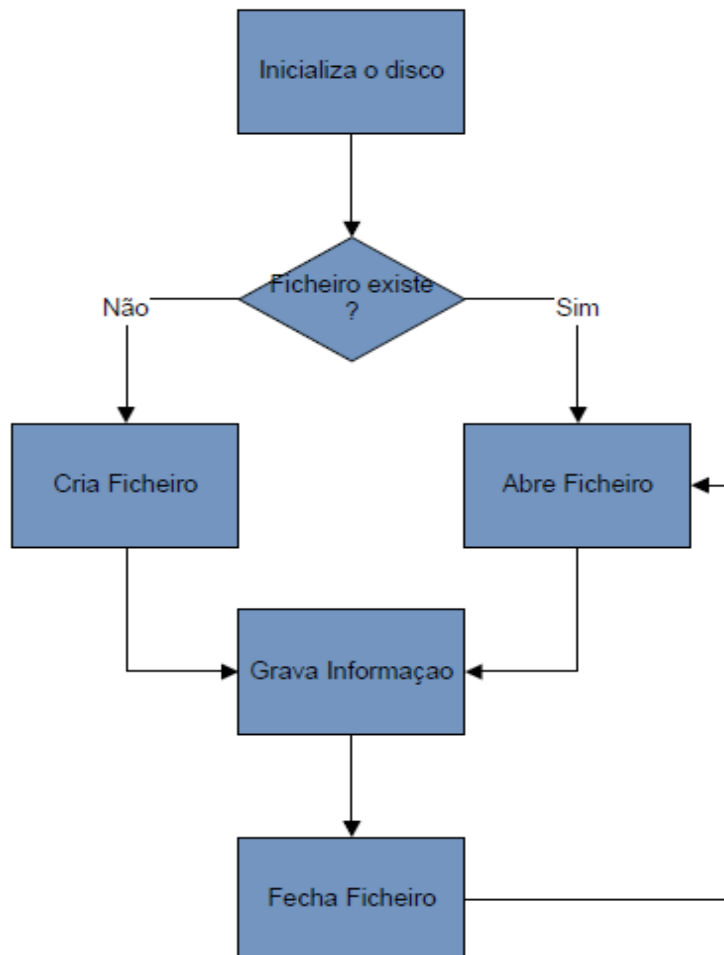


Figura 3.16 Diagrama de Blocos da Função para Gravar Dados no Cartão.

3.4.5 Medição da Tensão das Fases

Como já foi referido anteriormente, um dos objectivos da unidade de monitorização é medir a tensão em cada uma das fases do aerogerador. A solução implementada para realizar esta medida é suportada numa ponte rectificadora de tensão com integração sobre um condensador, divisor resistivo, regulador de isolamento e amplificadores de isolamento. A ponte rectificadora é composta por um bloco de 4 díodos que efectuem uma rectificação de onda completa a partir da tensão da rede alternada sinusoidal, seguida de um condensador que fornece um valor de tensão contínua próximo do valor de pico do

sinal de tensão original. Neste caso foi aplicada a ponte rectificadora 2KBP08M. O divisor resistivo ou divisor de tensão vai dividir a tensão contínua procedente da ponte rectificadora, adaptando-a aos níveis de tensão do amplificador de isolamento. Este é composto por uma resistência fixa de $2,2\text{M}\Omega$ e por uma resistência variável (potenciómetro) de $2,2\text{k}\Omega$. Uma vez que este módulo está implementado na mesma placa onde se encontra o microcontrolador, torna-se obrigatório isolar este bloco dos restantes circuitos por forma a maximizar a segurança. O isolamento é realizado recorrendo a três amplificadores de isolamento, HCPL 7800, e por um regulador de isolamento DCH010505S da Texas Instruments. Tal como indica a **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

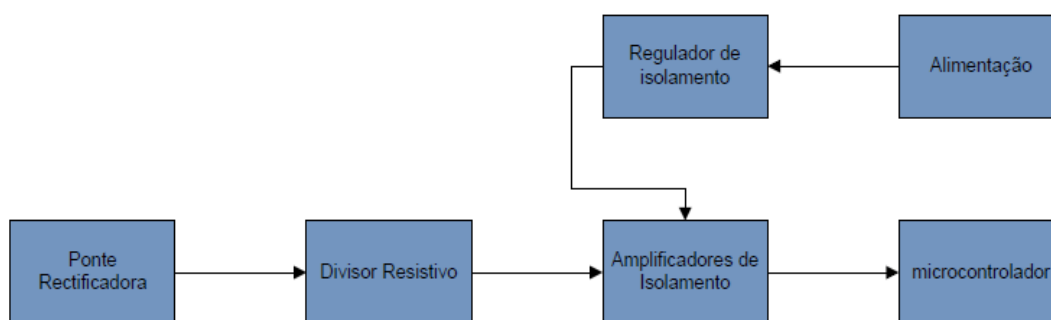


Figura 3.17 Diagrama de Blocos do Bloco Medidor de Tensão.

Existem contudo outras opções de realizar esta medida. Uma solução alternativa seria recorrer a transformadores de isolamento com redução de tensão. Desta forma o valor da tensão das três fases poderia ser facilmente lido pelo microcontrolador garantindo em simultâneo o isolamento.

Recentemente, a Analog Devices lançou no mercado um circuito integrado, ADE7854, que permite a realização directa das medidas pretendidas. Para tal apenas carece do auxílio de uma bobine de indução por cada fase. O circuito integrado é polifásico, o que permite a leitura das três fases do aerogerador, com a vantagem de efectuar a medida, respectiva quantificação e conversão analógico-digital internamente, comunicando o valor de tensão das três fases por SPI com o microcontrolador. Esta solução é uma alternativa a ponderar para uma futura instanciação do sistema.

3.4.6 Switch Analógico

Com vista a tornar o sistema mais eficiente do ponto de vista energético, o módulo autónomo de monitorização integra um *switch* analógico que permite ligar e desligar selectivamente a alimentação dos diversos sensores. Optimiza-se desta forma a performance do sistema. A utilização do *switch* analógico reduz significativamente o consumo de energia, uma vez que este permite ligar cada um dos sensores independentemente, esperar que seja efectuada a leitura e voltar a desligá-lo. Alguns sensores estão ligados por períodos de apenas alguns milisegundos, sendo o período de amostragem para a maioria deles da ordem da dezena de segundos. Todo o processo é controlado pelo microcontrolador que actua sobre o *switch* analógico, fazendo com que este ligue e desligue os sensores nos momentos apropriados.

O Max4614 da Maxim foi o *switch* analógico seleccionado para integrar este projecto. É caracterizado por conter quatro interruptores normalmente abertos, admitir uma potência nominal de 640mW, uma corrente sustentada em qualquer terminal de 75mA, tempos de resposta na ordem dos 6 ns e tolerar uma tensão nos terminais dos interruptores de $V_{DD} + 0,03V$. A tensão de V_{DD} é a tensão de alimentação do *switch* analógico e é igual a 5V, consumindo uma corrente no máximo de 1 μ A.

O baixo consumo de energia do módulo autónomo de monitorização é em grande parte devido à utilização deste componente electrónico.

3.4.7 Real Time Clock and Calendar

Para efeitos de caracterização temporal dos dados recolhidos pela unidade descrita nesta dissertação é importante ter presente uma referência temporal. A solução inicialmente pensada consistia em aproveitar o Real Time Clock and Calendar (RTCC) do microcontrolador. Contudo esta solução veio a revelar alguns problemas, nomeadamente em situações em que o sistema, em situações extremas, possa ficar desprovido de uma fonte de energia. Tal facto determina a re-iniciação do microcontrolador e consequentemente a perda de informação do relógio e calendário no momento em que o sistema volte a estar alimentado. Uma solução possível para o problema descrito consistia em guardar periodicamente o valor do RTCC em memória, usando esse valor para reiniciar o relógio. Essa solução não permite contudo a contabilização do tempo de *power down*, a

que se junta o facto do microcontrolador utilizado não disponibilizar memória do tipo EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory). A solução de aproveitar o RTCC do microcontrolador não se mostrou assim a mais indicada.

Neste caso foi aplicada uma terceira solução que consistiu em integrar no módulo de monitorização um relógio externo que inclui uma bateria independente do restante sistema e que previne o caso da falta de energia.

O relógio adoptado foi o M41ST95W da STMicroelectronic alimentado a 3.3V, consome no máximo uma corrente de 550nA e comunica com o microprocessador via SPI. A grande vantagem deste dispositivo é ser dotado de uma bateria externa acoplável mecanicamente por forma a estar permanentemente em funcionamento, sendo inicializado apenas uma vez.

3.4.8 Implementação do Hardware

Para completar a etapa da implementação do Hardware foi fundamental definir o esquemático do circuito de interligação dos diversos componentes escolhidos, a partir do qual foi possível desenvolver o circuito impresso onde podem ser soldados todos os componentes. Para projectar os respectivos esquemas foi utilizado o Orcad 15.7 com a ferramenta Orcad Capture CIS (ver Anexo A). Para desenhar os caminhos respeitantes às ligações feitas no *schematics*, e os *footprints* dos vários circuitos integrados, foi utilizada a ferramenta Orcad Layout Plus. Obteve-se assim o desenho completo dos esquemas em placa de circuito impresso do módulo autónomo de monitorização (ver Anexo B).

Na Figura 3.18 pode visualizar-se o resultado da conjugação das várias etapas da arquitectura do hardware.

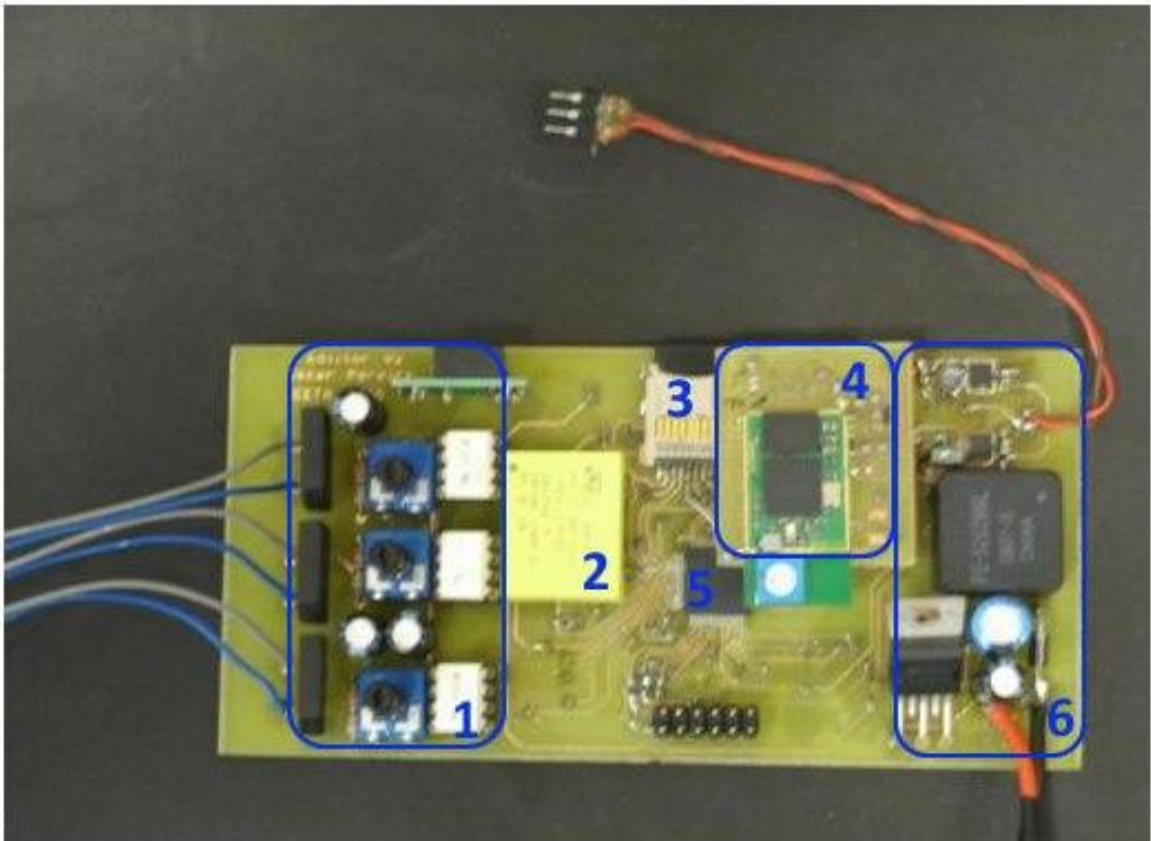


Figura 3.18 Módulo Autônomo de Monitorização.

onde

1-Bloco de Medidor de Tensão, 2-Real Time Clock and Calendar, 3- Cartão μ SD, 4-Bluetooth, 5-Microcontrolador, 6-Bloco de Alimentação.

3.5 Arquitectura do Software

A conclusão deste projecto implica o desenvolvimento de software necessário para programar o microcontrolador com a finalidade de gerir e coordenar o sistema. Nesse sentido foi necessário desenvolver um conjunto de funções em linguagem C, para o que se recorreu ao ambiente de desenvolvimento MPLAB IDE. Estas funções foram compiladas com recurso ao compilador C30 da Microchip e posteriormente transferidas para o microcontrolador, usando um programador ICD2, igualmente da Microchip. A interface módulo-computador é assegurada pelo PComm Lite v1.4.

Foram ainda criados dois programas para analisar os dados recolhidos. Um primeiro programa permite uma análise online dos dados, uma vez que estes já estão processados. O outro programa efectua uma leitura dos dados guardados no cartão de memória, procedendo posteriormente ao seu processamento para visualização gráfica dos dados, proporcionando uma compreensão mais intuitiva dos mesmos.

3.5.1 Estrutura do Software do Microcontrolador

Para mais fácil compreender a arquitectura relativa à programação do microcontrolador pode observar-se o diagrama de fluxo da **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

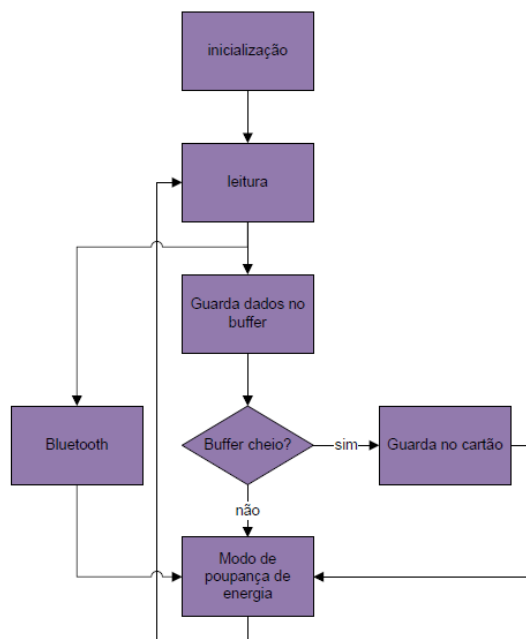


Figura 3.19 Diagrama de Blocos do Software do Microcontrolador

A inicialização das variáveis, das estruturas inerentes ao sistema, da UART, das interrupções e dos restantes módulos periféricos do microcontrolador são realizadas no bloco de inicialização. Uma vez efectuado o processo de inicialização não será necessário o microcontrolador voltar a este bloco. Seguindo na hierarquia do diagrama o bloco seguinte é o de leitura dos diferentes valores. A activação e respectiva leitura dos sensores são realizadas de uma forma ordenada e sequencial, e com uma periodicidade de aproximadamente 10 segundos. O microcontrolador determina qual o sensor que irá ser lido, efectua a activação do mesmo utilizando o *switch* analógico, aguarda pela leitura do valor e volta a desligar o sensor.

Os valores lidos dos diferentes sensores são enviados em simultâneo por Bluetooth, para um ou mais dispositivos nas proximidades do módulo. O módulo Bluetooth pode ser configurado para de forma a que só um dispositivo, com determinado endereço possa ser conectado e receber a informação enviada por este. Esta configuração previa destina-se a assegurar a confidencialidade da informação enviada.

Aos dados adquiridos é associado, no nibble mais significativo um código de identificação do parâmetro lido.

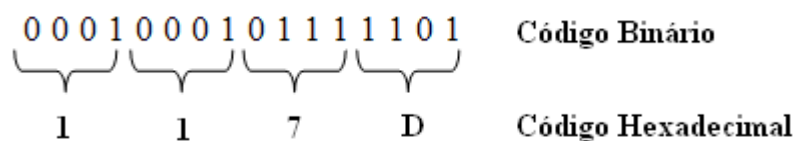


Figura 3.20 Exemplo de conversão de Binário para Hexadecimal

No exemplo apresentando na Figura 3.20 o primeiro “1” do valor hexadecimal representa a identificação do tipo de valor lido e os restantes três caracteres o valor lido pela ADC. O buffer suporta até 2340 caracteres em código hexadecimal. Uma vez cheio este buffer, os valores ali armazenados são transferidos para o cartão de memória SD.

Identificação	Valor associado
1	Tensão do painel solar
2	Velocidade do vento
3	Direcção do vento do sensor da torre
4	Direcção do vento do sensor auxiliar
5	Tensão da fase 1
6	Tensão da fase 2
7	Tensão da fase 3
8	Corrente da fase 1
9	Corrente da fase 2
A	Corrente da fase 3
F	Referência temporal

Tabela 3.3 Identificação dos Valores

Por fim o microcontrolador entra no estado de poupança de energia, que consiste em desligar todos os sensores e reduzir a frequência de funcionamento para o mínimo, isto é, dividir a frequência normal de funcionamento por 256 ($8\text{MHz} / 256 = 31,25 \text{ kHz}$), até um temporizador interno indicar que é altura de efectuar uma nova leitura.

3.5.2 Plataforma MatLab

Foi utilizada a plataforma MatLab, a correr em sistema operativo Windows, para a implementação de dois programas com vista a tornar mais perceptível o funcionamento e apresentação de resultados do módulo autónomo de monitorização.

Como já foi referido anteriormente o primeiro programa recebe os dados através do PComm Lite. A informação capturada por este programa está pronta a ser usada com o intuito de gerar uma visualização gráfica.

No segundo programa a informação é recolhida a partir do cartão de memória e é necessário proceder à sua separação, processamento e representação gráfica. Para alcançar este objectivo foi desenvolvido um programa que verifica o campo destinado à identificação e assim é capaz de separar cada valor. Posteriormente efectua o processamento usando as equações adequadas e por fim gera a visualização gráfica dos valores adquiridos.

4 Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Neste capítulo irá proceder-se à apresentação de resultados práticos. Antes de ser colocado o sistema na torre eólica foi essencial executar alguns testes a fim de verificar o correcto funcionamento do módulo autónomo de monitorização. Procedeu-se a uma verificação extensiva de alguns sinais do sistema, nomeadamente, sinais de clock, sinais de transmissão e recepção de informação via SPI, tensões de alimentação, sinais de controlo de dispositivos entre outros. Para efectuar esta verificação usaram-se ferramentas de medida de bancada.

Na segunda parte desta secção apresentam-se resultados relativos a testes práticos realizados. O primeiro teste consiste em alimentar o módulo de forma autónoma utilizando a bateria e o painel solar. O segundo teste consiste em medir os parâmetros directamente da torre eólica, localizada perto do IEETA.

4.2 Resultados em Laboratório

Estes resultados foram adquiridos em laboratório, e consistem em colocar valores de tensões conhecidas nos canais das ADC e uma frequência no porto correspondente à interrupção que mede a velocidade do vento, com o objectivo de calibrar os sensores e de verificar o comportamento do sistema.

Foi montado um circuito de teste tal como ilustra a Figura 4.1. Os dados foram recolhidos durante aproximadamente uma hora e guardados no cartão de memória, posteriormente foram processados e apresentados numa representação gráfica.

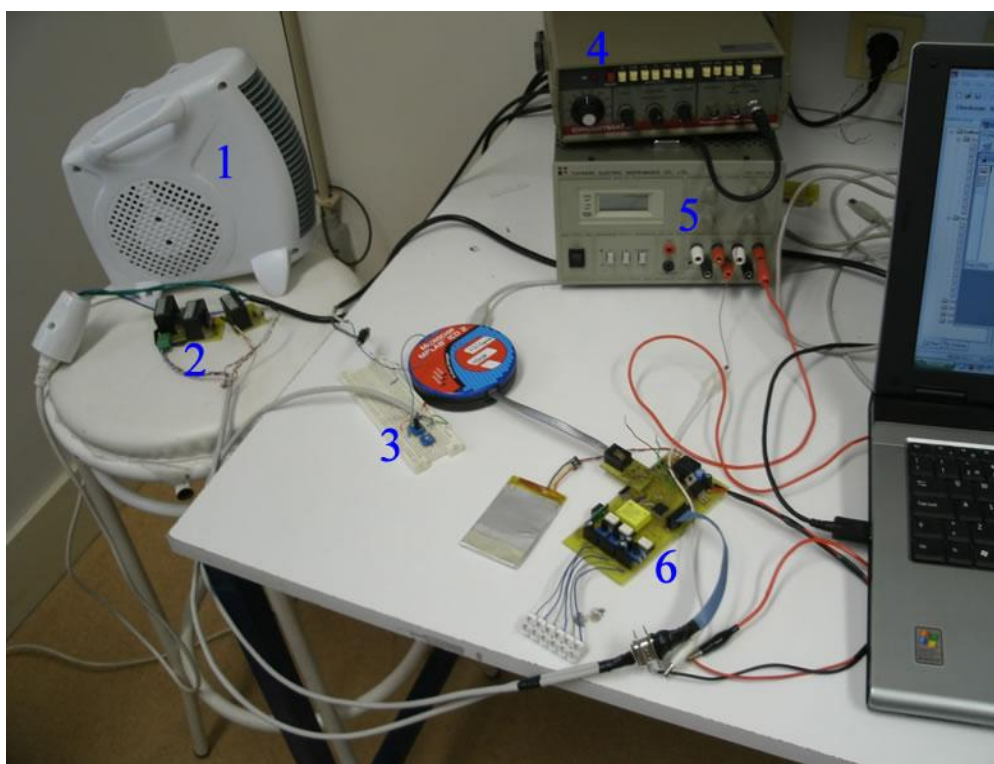


Figura 4.1 Circuito de Testes

1–Aquecedor de 2000W, 2-Sensores de Corrente, 3-Placa Branca de Testes, 4-Gerador de Sinais, 5-Fonte de Alimentação, 6-Modulo Autónomo de Monitorização.

4.2.1 Tensão do Pannel

A tensão do painel foto-voltaico foi simulada utilizando a fonte de alimentação do laboratório, fazendo variar as tensões da fonte registou-se o seguinte gráfico.

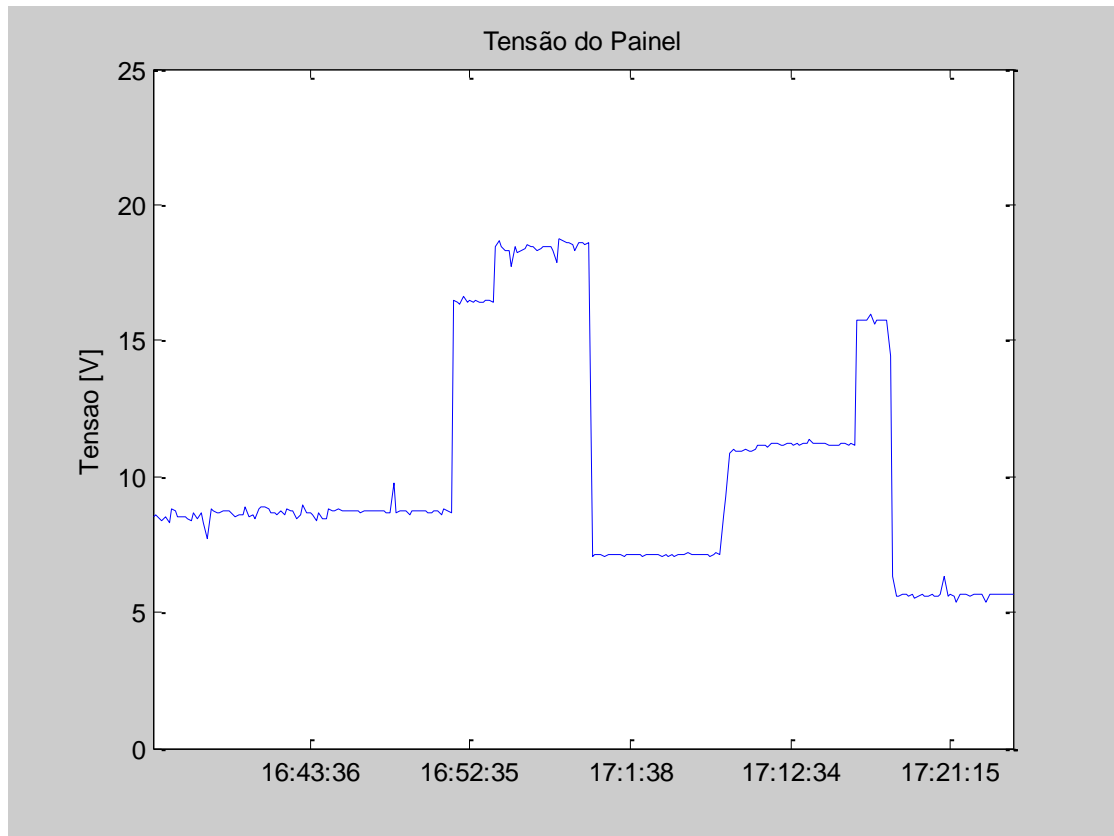


Figura 4.2 Tensão do Pannel em Laboratório

O módulo autónomo de monitorização é alimentado através da fonte de alimentação. Inicialmente a tensão é próxima de 9V, fazendo depois variar o seu valor até próximo dos 20V, terminando esta captura com uma tensão próxima dos 6V, não podendo descer a baixo deste valor uma vez que este é um valor perto mínimo que mantém o módulo a funcionar. Ainda foram efectuadas algumas variações do valor de alimentação por forma a verificar a correcta medida desta variável. Os valores medidos apresentam ligeiras variações. Isto deve-se ao facto do sistema integrar componentes electrónicos como bobinas e condensadores capazes de armazenar energia, e o valor lido pela ADC também pode vir alterado devido a variações da tensão de referência a ADC.

4.2.2 Velocidade do Vento

Para simular a velocidade do vento recorreu-se a uma fonte de sinais, gerando uma onda quadrada de saída com uma amplitude de 3V e com frequência variável. Este aparelho simula na perfeição o sensor de velocidade do vento, visto que este também responde com uma onda quadrada com frequência variável proporcional à velocidade do vento.

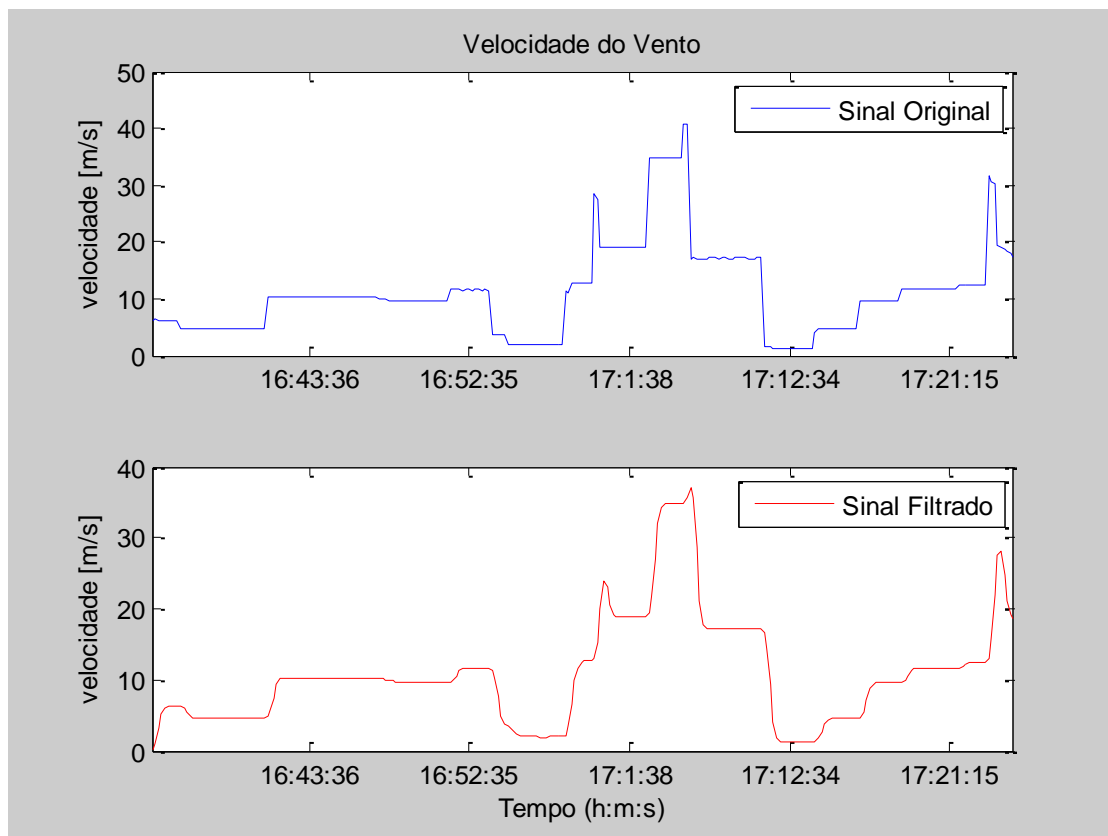


Figura 4.3 Velocidade do Vento em Laboratório.

A gama de velocidade do vento para exploração utilizando aerogeradores está compreendida geralmente entre 3m/s a 15m/s. O módulo permite efectuar mediadas até próximo de 45m/s que corresponde a velocidades de vento na ordem de 162km/h. A velocidade desta ordem de grandeza dos aerogeradores já estão desligados a algum tempo por razões de segurança. A Figura 4.3 apresenta dois gráficos, o primeiro é referente ao sinal original, o segundo é referente ao sinal filtrado. Este permite uma melhor compreensão dos valores. O filtro aplicado é um filtro FIR (Finite Impulse Response) de 5ª

ordem passa baixo. O facto do sinal filtrado começar em zero deve-se a aplicação do filtro, uma vez que este utiliza as quatro amostras anteriores para efectuar o cálculo da amostra actual, assumindo as quatro primeiras como zero.

4.2.3 Correntes nas Fases

A corrente é medida usando os sensores que foram instalados na torre eólica, fazendo passar o fio correspondente à fase da alimentação de um aquecedor de 2000W, este possui dois níveis de carga, sendo adicionadas ou retiradas com o objectivo de fazer variar a corrente eléctrica. Antes de começar a ler os valores de corrente é necessário proceder à leitura de uma série de valores sem cargas a fim de calibrar os sensores. O gráfico demonstra a variação da corrente consumida pelo aquecedor em função das cargas.

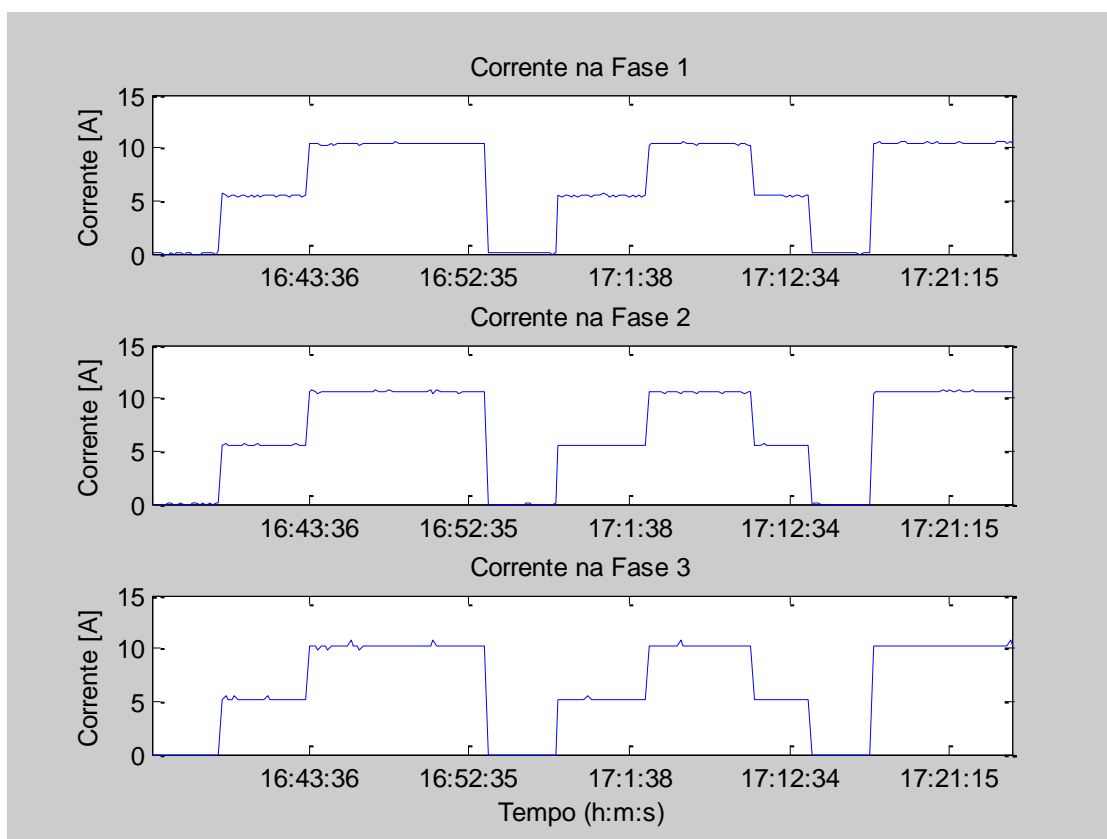


Figura 4.4 Correntes das Fases em Laboratório.

Pode-se constatar que o valor apresentado pelos sensores de corrente são semelhantes, o que era de esperar uma vez que estão todos a medir a corrente que atravessa

o mesmo fio condutor. No intervalo das 16:57 às 17:2 é visível o consumo de 5A o que corresponde a ligar uma carga do aquecedor. Depois essa corrente consumida sobe perto dos 11A. Esta representa a corrente consumida pelo aquecedor com as duas cargas ligadas. A pequena variação desse valor deve-se a variações da tensão de referência da ADC induzidas por ruído na alimentação da placa.

4.2.4 Direcção do Vento

Como o sensor de direcção do vento apresenta níveis de tensão na sua saída, utilizou-se um potenciómetro com o desígnio de alternar os valores lidos pela ADC. O primeiro gráfico imita os valores lidos pelo sensor de direcção instalado na torre. O segundo retrata um possível sensor de direcção de vento auxiliar de maneira a obter uma direcção absoluta do vento. Para efeitos de testes, ambas as entradas das ADC estão ligadas ao mesmo potenciómetro. A informação é apresentada num histograma angular (rose), em que os valores lidos pela ADC variam entre 0V e 3.3V, correspondendo a 0 radianos e 2π radianos respectivamente e representados no gráfico em graus (0° a 360°).

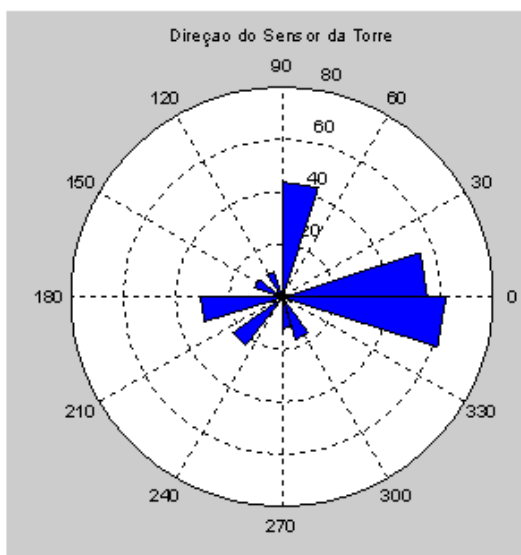


Figura 4.5 Direcção do Sensor da Torre

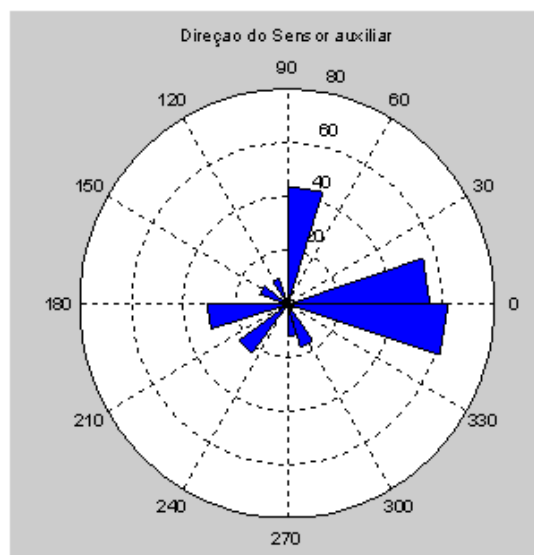


Figura 4.6 Direcção do Sensor da Auxiliar

Sinais dos sensores de direcção [V]	Tensão correspondente em $0-2\pi$	Tensão correspondente em ângulos $0^\circ-360^\circ$	Número de elementos
0-0.165	0.1555	9	55
0.165-0.33	0.4666	27	0
0.33-0.495	0.7777	45	1
0.495-0.66	1.0887	62	0
0.66-0.825	1.3998	80	44
0.825-0.99	1.7109	98	0
0.99-1.155	2.0219	116	10
1.155-1.32	2.3330	134	0
1.32-1.485	2.6441	151	11
1.485-1.65	2.9551	169	3
1.65-1.815	3.2662	187	31
1.815-1.98	3.5773	205	1
1.98-2.145	3.8883	223	23
2.145-2.31	4.1994	241	0
2.31-2.475	4.5105	258	0
2.475-2.64	4.8215	276	12
2.64-2.805	5.1326	294	17
2.805-2.97	5.4437	312	0
2.97-3.135	5.7547	330	0
3.135-3.3	6.0658	348	62

Tabela 4.1 Tabela de Correspondência.

Na Tabela 4.1 encontram-se representados 20 intervalos de tensão nos quais são quantificados os valores lidos através da ADC. A segunda coluna da tabela representa o valor médio do intervalo da tensão convertido em radianos, a terceira coluna representa o correspondente valor em graus e a última coluna indica o número de elementos representados em cada barra do diagrama.

Os gráficos são semelhantes, o que era de esperar. Algumas barras apresentam um número elevado de elementos o que significa um número elevados de medidas nesses intervalos. Analogamente pode-se fazer corresponder os ângulos a pontos cardeais por forma a obter a direcção do vento, sendo necessário apenas efectuar uma calibração do sensor recorrendo a uma bússola.

4.2.5 Tensões das Fases

Para efectuar o teste ao bloco medidor de tensão, ligou-se a tensão da rede à entrada do bloco de tensão.

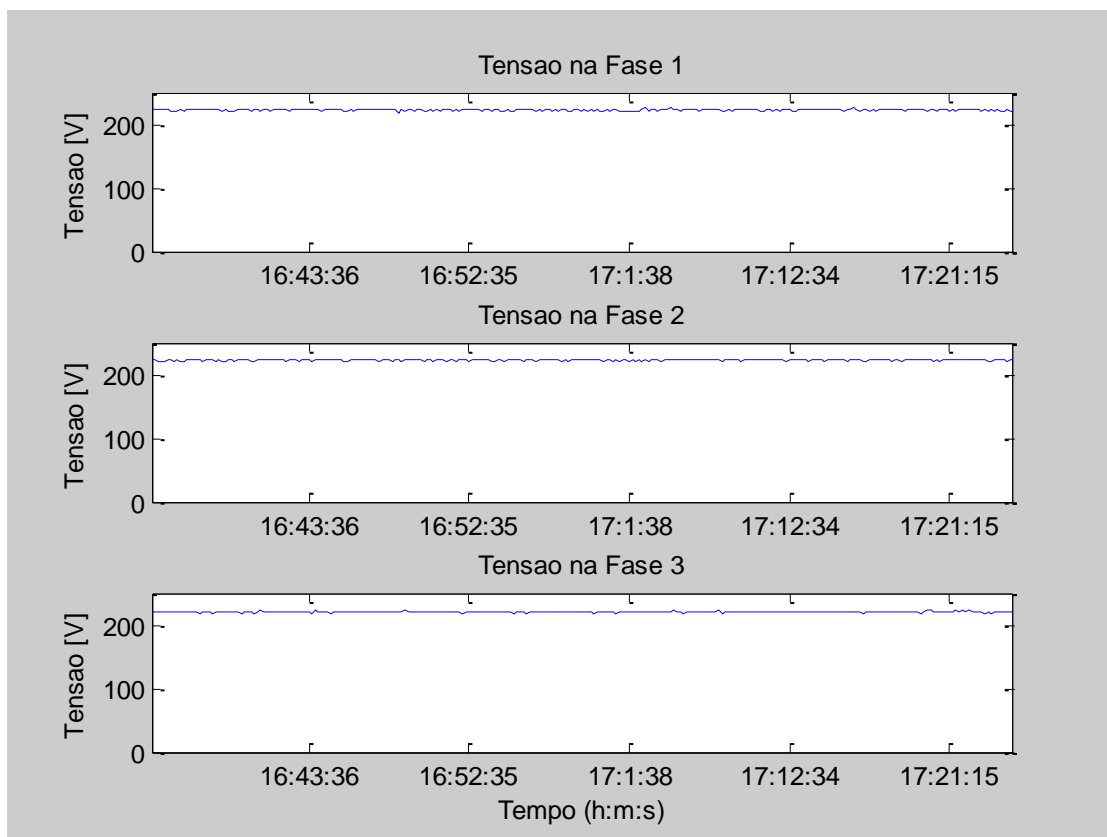


Figura 4.7 Tensão das Fases.

A Figura 4.7 ilustra o valor da tensão da rede. O valor de tensão na entrada dos amplificadores é de 80mV, depois este valor é amplificado oito vezes, devido ao ganho fixo do amplificador passando para 640mV este valor é adicionado ao offset de 2.55V, correspondendo assim a 3.19V na entrada da ADC. Qualquer variação por mais pequena que seja na entrada do amplificador irá reflectir-se na sua saída, esta é uma fonte das variações verificadas nos gráficos, outra é a variação da tensão de referência da ADC.

Os amplificadores de isolamento cumprem o principal objectivo que é isolar os dois circuitos. Contudo apresentam o inconveniente de introduzir um offset de 2.55V quando ligado em modo comum.

Esta solução esgota quase por completo a gama da ADC (0V a 3.3V).

Uma solução seria diminuir a tensão de entrada do amplificador recorrendo ao potenciômetro. Esta solução não é fiável uma vez que o ajuste do valor do potenciômetro não é rigoroso.

4.3 Resultados Práticos

4.3.1 Teste de Autonomia

Uma vez realizados os testes em laboratório foram igualmente realizados testes práticos em condições reais. O primeiro teste consistiu em demonstrar a autonomia do sistema. Para isso utilizou-se o painel solar mencionado na secção 3.4.1.1, juntamente com um sensor de velocidade também referido anteriormente, tal como ilustra a Figura 4.8.



Figura 4.8 Teste Prático de Autonomia

1-Painel Solar, 2-Multímetro Digital, 3-Bateria, 4-Módulo Autónomo de Monitorização, 5-Sensor de velocidade do vento (Anemómetro).

4.3.1.1 Tensão do Painel Solar

Este teste foi concretizado com base na montagem referida anteriormente. Este permite verificar os valores de tensão que o painel fornece ao sistema.

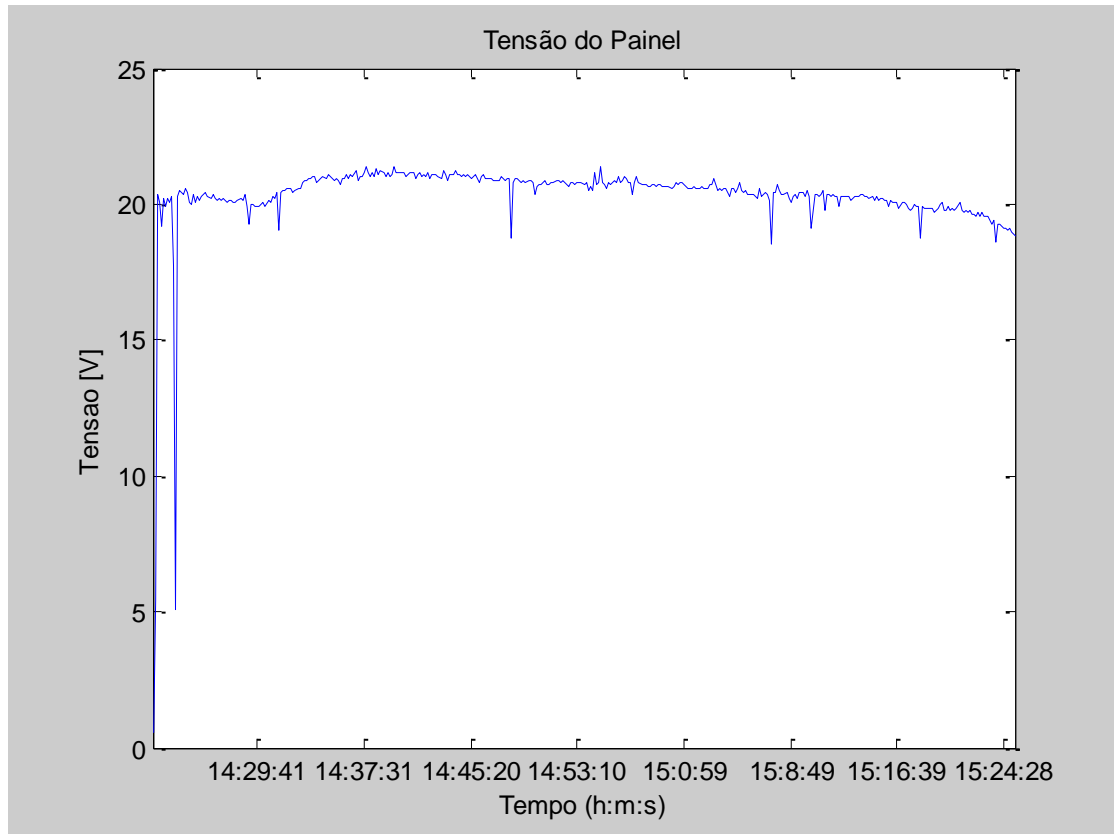


Figura 4.9 Tensão do Painel Solar na Prática

Uma análise rápida dos resultados apresentados permite concluir que painel solar apresenta valores de tensão muito bons para efectuar uma carga da bateria e alimentar o sistema. Contudo o gráfico da Figura 4.9 apresenta duas quedas de tensão significativas. A primeira deve-se ao facto de, no início, os condensadores estarem a carregar, e a segunda as condições climatéricas, uma vez que estas não eram as ideais. O valor da tensão do painel solar estava a ser medido em simultâneo pelo multímetro digital.

4.3.1.2 Velocidade do Vento

Os valores de velocidade do vento medidos tiveram por base o uso de um sensor de velocidade de vento (anemómetro) igual ao instalado na torre eólica.

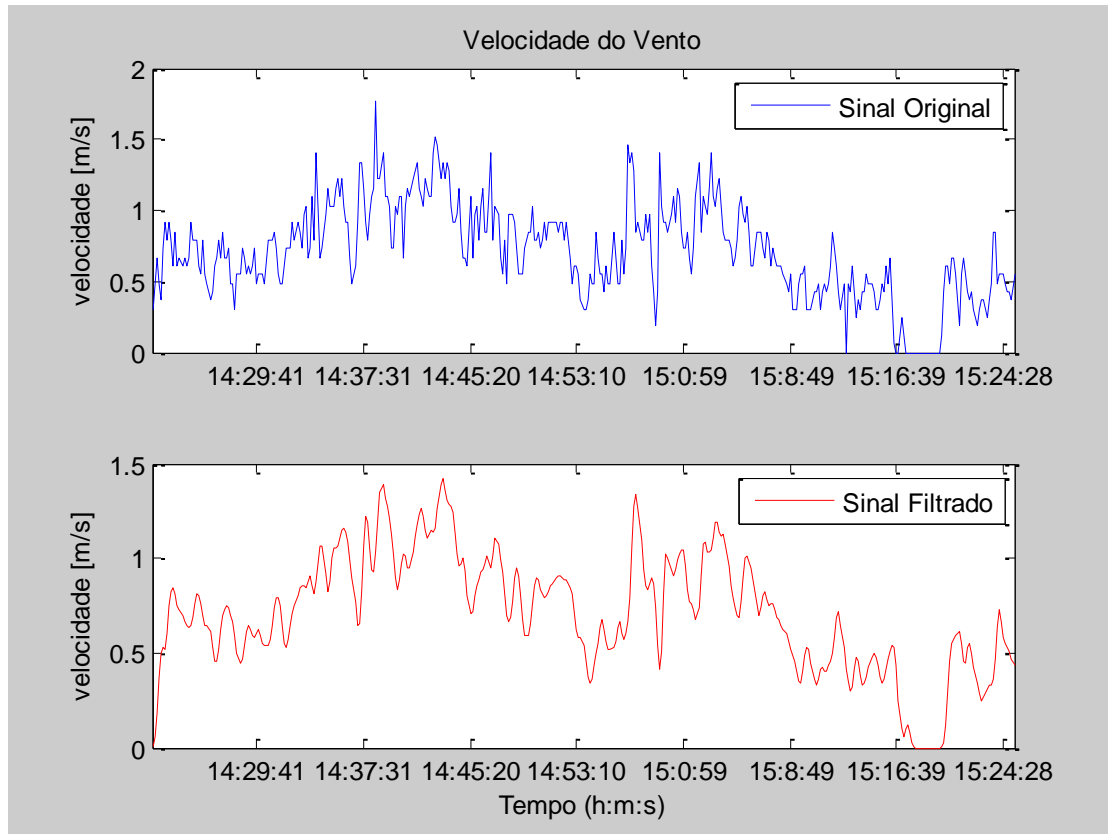


Figura 4.10 Velocidade do Vento no Teste de Autonomia.

À semelhança do que aconteceu aos valores simulados para a velocidade do vento, também os da Figura 4.10 foram filtrados por um filtro FIR passa baixo. Como é facilmente constatado a velocidade do vento no momento da realização da experiência é baixa, o que inviabilizava a exploração de energia eólica. No entanto é preciso ter em conta que estes valores foram medidos ao nível do solo onde a velocidade do vento é mais reduzida devido à interferência de obstáculos, tais como prédios e árvores.

4.3.2 Teste no Aerogerador

Este teste teve como objectivo monitorizar as variáveis de uma turbina eólica. Para isso recorreu-se à torre eólica instalada junto do IEETA. A imagem seguinte ilustra a montagem utilizada na medição dos parâmetros.

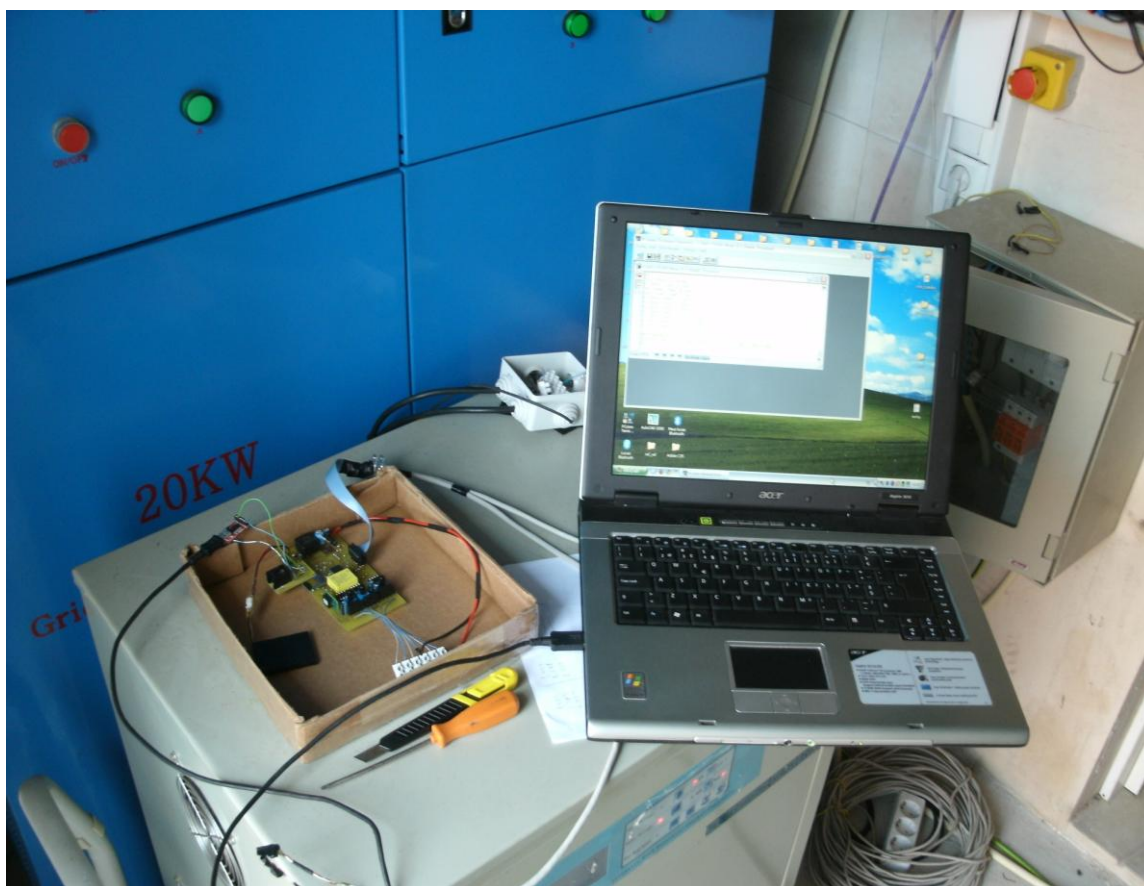


Figura 4.11 Montagem do Módulo na Torre Eólica

4.3.2.1 Velocidade do Vento

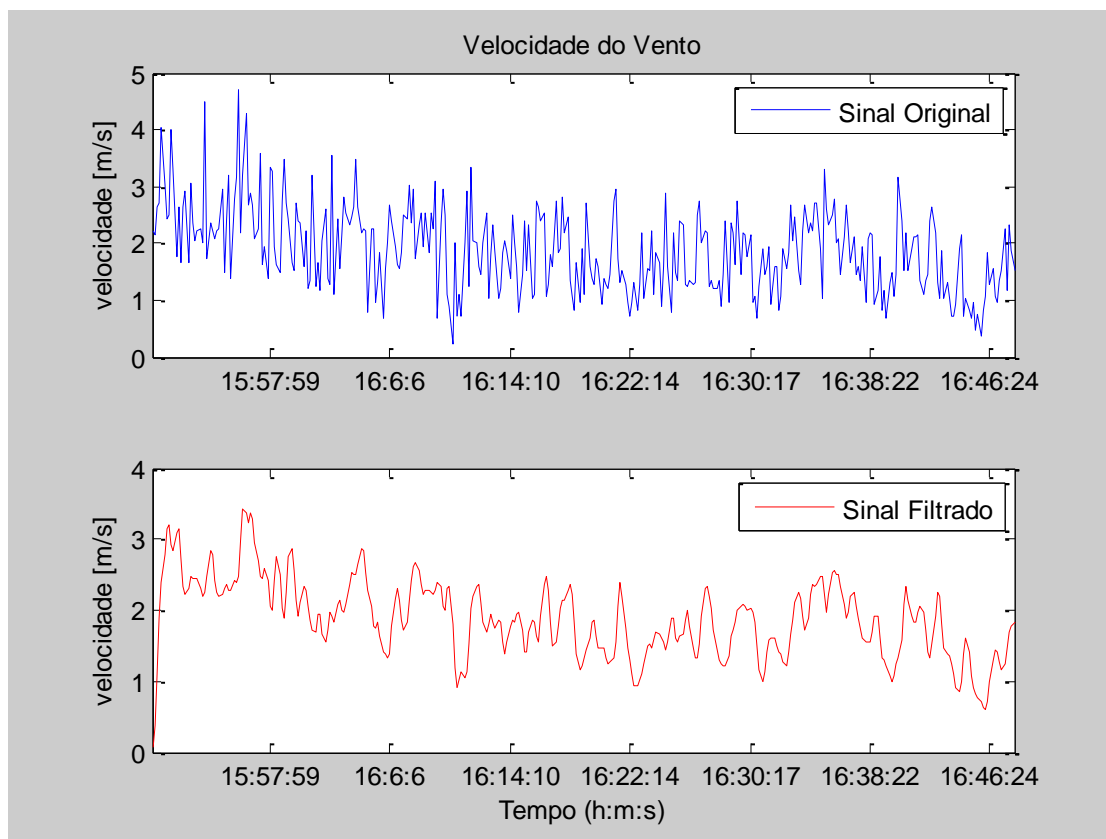


Figura 4.12 Velocidade do Vento da Torre

Efectuando uma análise rápida da Figura 4.12, pode-se verificar que a velocidade do vento varia 2 a 3m/s em períodos pequenos. O segundo gráfico ilustra uma variação mais suave dos valores lidos, onde é possível realizar uma análise mais clara dos valores, porque não apresenta valores de pico. Contudo no primeiro gráfico é possível analisar todas as oscilações medidas, obtendo valores reais.

4.3.2.2 Direcção do Vento

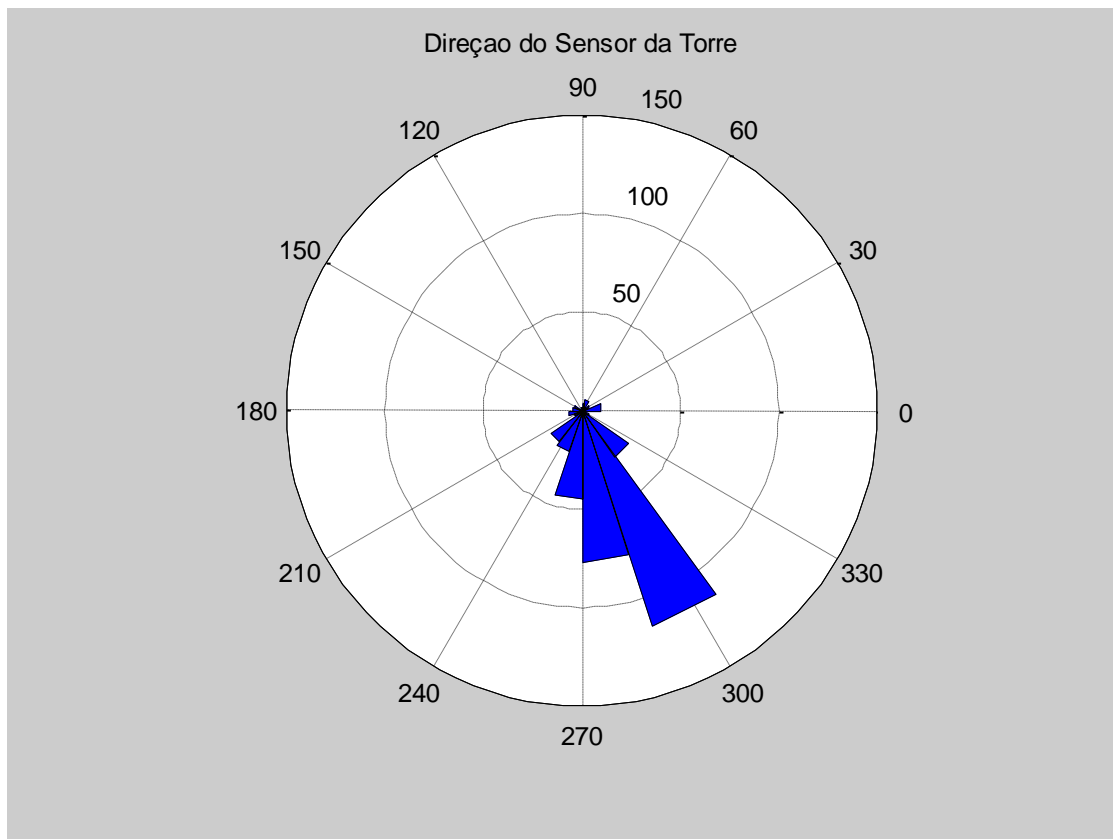


Figura 4 13 Direcção do Vento do Sensor Instalado na Torre.

A direcção indicada por este sensor é relativa, na medida em que a base de suporte do sensor é a torre eólica, sendo esta móvel. No entanto é visível que o vento é predominantemente de uma determinada direcção entre 270° a 305°, o que corresponde a uma tensão medida entre 2,64V a 2,94V. Este sensor é fundamental no controlo da torre eólica, uma vez que indica o alinhamento das pás do aerogerador com a direcção do vento.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo é feita uma apreciação global do trabalho realizado, tendo em conta os resultados obtidos e apresenta propostas de trabalho futuro.

5.1 Conclusões

O módulo autónomo de monitorização permitiu medir, processar e armazenar os distintos valores dos sensores.

O sistema realiza medidas de elevada qualidade referentes à velocidade do vento e respectiva direcção. No entanto para obter uma direcção absoluta do vento foi necessário um sensor de direcção auxiliar. O sistema estava preparado para efectuar a sua leitura, respectivo processamento e armazenamento de dados. Os valores lidos da corrente pelo módulo, também apresentaram uma elevada qualidade. O sinal proveniente do sensor estava bem condicionado de modo a utilizar toda gama disponível pela ADC, sendo sensível a variações de aproximadamente 120mA. A medição do valor da corrente em cada fase do aerogerador não foi possível devido a avaria do aerogerador na altura em que esses testes iam ser realizados. A leitura da tensão representou o principal desafio deste projecto, uma vez que foi necessário encontrar um equilíbrio entre a qualidade dos valores lidos e o isolamento do sistema. Esta foi realizada de uma forma segura, em virtude do isolamento proporcionado pelos amplificadores de isolamento e do regulador de isolamento. Porém a utilização dos amplificadores de isolamento acarretou um factor indesejado, a presença de offset elevado.

O módulo autónomo de monitorização apresentou ainda duas entradas auxiliares da ADC, caso seja necessário monitorizar outras variáveis.

O requisito da comunicação sem fios também foi alcançado, tendo sido ainda possível de efectuar uma comunicação via USB (Universal Serial Bus). A informação foi guardada num cartão de memória, o que representa mais um objectivo alcançado.

Posto isto os objectivos foram todos concretizados, demonstrando que o módulo autónomo de monitorização é um sistema versátil e com várias potencialidades de implementação futura.

5.2 Trabalho Futuro

Os resultados desta dissertação são bastantes satisfatórios. Contudo pode ser complementada com alguns trabalhos futuros:

- Instalar um sensor de direcção auxiliar de modo a permitir obter uma direcção absoluta do vento. Cruzando os valores lidos do sensor instalado na torre com os valores lidos pelo sensor auxiliar poder-se obter informação completa da direcção do vento.
- Pode ser interessante medir também a temperatura do ar com o desígnio de complementar a informação acerca do vento.
- Melhorar o bloco medidor de tensão, aplicando um amplificador na saída dos amplificadores de isolamento por forma a condicionar o sinal e eliminar o offset, ou utilizar outro método apresentado pelo autor.
- Tentar otimizar o bloco de alimento de modo a reduzir o consumo deste, e tornar o sistema o mais eficiente possível e consequentemente aumentando a autonomia do módulo.
- Desenvolver uma interface que permita disponibilizar em tempo real a informação recolhida pelo módulo autónomo de monitorização num site.

Referências

- [1] Fernando Kitzinger Dannemann. Anemómetros. 2008. Último acesso em Março de 2010. <http://recantodasletras.uol.com.br/artigos/943880>
- [2] Portal das Energias Renováveis. Conversão: a energia do vento. Último acesso em Março de 2010
http://alunos.esfelgueiras.org/alunos/energiasrenovaveis/index_ficheiros/Page706.htm
- [3] Portal das Energias Renováveis. Conversão: Lei de Betz. Último acesso em Março de 2010
http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=60&ID_area=3&ID_sub_area=6
- [4] DanishWind Industry Association. Wind turbines deflect the wind. Último acesso em Março de 2010. <http://www.windpower.org/EN/tour/wres/tube.htm>
- [5] Energia eólica ganha força no mundo; EUA lideram crescimento. U Último acesso em Março de 2010. <http://pt.kioskea.net/news/10132-energia-eolica-ganha-forca-no-mundo-eua-lideram-crescimento>.
- [6] Imagem retirada,
<http://www.intranet.cathedralgrammar.school.nz/Inhouse%20web%20sites/WindPower/fr/pictures/juul.htm>. Último acesso em Março de 2010.
- [7] Jizhong Zhu and Kwok Cheung .Analysis of Regulating Wind Power for Power Systems. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE 2009, pages: 1-6.
- [8] World Wind Energy Association (WWEA). Último acesso em Setembro de 2010.
<http://www.wwindea.org/home/index.php> .
- [9] European Wind Energy Association (EWEA). Último acesso em Setembro de 2010.
<http://www.ewea.org>

- [10] Sebastian G. M. Kr  amer, Fernando Puente León, and Benoît Appert. Fiber Optic Sensor Network for Lightning Impact Localization and Classification in Wind Turbines. Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2006 IEEE International Conference on 2006 pages: 173-178.
- [11] M. Mohsin Khan, M Tariq Iqbal, Faisal Khan. Reliability and Condition Monitoring of a Wind Turbine.
- [12] Ricardo Pinto. Wikienergia, Charles F. Brush.   ltimo acesso em Maio de 2010. http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Charles_F._Brush.
- [13] The Wind Energy Pioneers: The Gedser Wind Turbine. Dnaish Wind Industry Association.
- [14] Development of Vertical-Axis Wind Turbine with Asynchronous Generator Interconnected to the Electric Network.
- [15] R.J. Templin e R.S. Rangi. Vertical-axis Wind turbine development in Canada. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, IEE Proceedings 1983 volume: 130 issue: 9 pages: 555 -561. IEEE 1983.
- [16] Gupta, R, Biswas, A., Sharma, K.K. Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor. Renewable Energy: An International Journal Sep2008, Vol. 33 Issue 9, p1974-1981. 2008.
- [17] Rui YANG and Ren-nian LI. Research of the Rotational Effects on the Aerodynamics Characteristics of Horizontal Axis Wind. 2009.
- [18] Ricardo Dutra. Energia Eólica Princ  pios e Tecnologias. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica S  rgio de Salvo Brito. 2008.
- [19] Dr Brown. Environmental studies in the Department of Energy's Renewable Energy Programmes. Environmental Impact of Renewable Energy Sources, IEE Colloquium on 1989 pages: iv/i-iviv. 1989.
- [20] Alexandre Moraes Lopes. Produção Eólica e Enquadramento Técnico-Econ  mico em Portugal. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- [21] João Pedro Couto e Armanda Couto. Integração dos Projectos Eólicos com a Envolvente. Departamento de Engenharia Civil Universidade da Minho.
- [22] Shashikanth Suryanarayanan and Amit Dixit. On the Dynamics of the Pitch Control Loop in Horizontal-Axis Large Wind Turbines. American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005 pages: 686-690 vol. 1.2005.
- [23] Caroline Faria. Controladores - energia eólica. Último acesso em Março de 2010. <http://www.infoescola.com/tecnologia/controladores-energia-eolica/>.
- [24] Chalasani, S., Conrad, J.M. A survey of energy harvesting sources for embedded systems. Southeastcon, 2008. IEEE 2008 pages: 442-447.
- [25] Energy Harvesting. ULP meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineers. Texas Instruments.
- [26] Energy Harvesting: Energy Harvesting Solutions from Texas Instruments. Último acesso em Setembro de 2010. <http://focus.ti.com/docs/solution/folders/print/517.html>.
- [27] 20kW Wind Turbine Generator, Liten Windpower Co., Ltd; Último acesso em Setembro de 2010. Disponível <http://www.wind-turbine.cn/20kW-wind-turbine-generator.htm>.
- [28] Anemómetro. In Infopédia [Em linha]. Porto: Porto Editora, 2003-2010. Último acesso em Maio de 2010. Disponível em [www: <URL: http://www.infopedia.pt/\\$anemometro>](http://www.infopedia.pt/$anemometro).
- [29] Calibration Uncertainty Comparisons Between Various Anemometers. Rachael V. Coquilla and John Obermeier *Otech Engineering, Inc., Davis, CA 95618*.
- [30] Roberto Avelino Cecílio Ventos, disciplina de Meteorologia Agrícola e Meteorologia Florestal.
- [31] Paulo Neis. Efeito Hall: Teoria. Transdutores de Corrente por Efeito Hall. Abril de 2000 Último acesso em Maio de 2010. Disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/neis/index.html>.

[32] Daniel Baumann. Protótipo de um Sistema de Segurança Residencial com Linux embarcado. Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciência Exatas e Naturais Curso de Ciência de Computação. 2005.

[33] Hall Effect Current Sensors L01Z***S05 Series, Tamura, Datasheet, Último acesso em Setembro de 2010.

<http://www.tamuracorp.com/clientuploads/pdfs/engineeringdocs/L01ZXXXS05.pdf>

[34] Raloss-SR5-36-Solar Panel, 5W, Último acesso em Setembro de 2010.

<http://pt.farnell.com/raloss/sr5-36/solar-panel-5w/dp/1462491>

[35] Solar Module Test Report, Raloss, Datasheet, Último acesso em Setembro de 2010.

<http://www.farnell.com/datasheets/318096.pdf>

[36] TL2575-05 VOLTAGE REGULATORS, Texas Instruments, Datasheet Último acesso em Outubro de 2010. <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tl2575-05.pdf>>

[37] TPS63001 HIGH EFFICIENT SINGLE INDUCTOR BUCK-BOOST CONVERTER WITH 1.8-A SWITCHE, Texas Instruments, Datasheet Último acesso em Outubro de 2010. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps63001.pdf>

[38] BQ24074-1.5A USB-FRIENDLY Li-Ion BATTERY CHARGER AND POWER-PATH MANAGEMENT IC, Texas Instruments, Datasheet Último acesso em Outubro de 2010. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/bq24074.pdf>.

[39] PIC24FJ128GA006, Microchip, Datasheet, Último acesso em Outubro de 2010.

<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39747d.pdf>>

[40] F2M03GLA Low power Bluetooth™ Module with antenna- F2M03GL, Datasheet, Último acesso em Outubro de 2010.

http://www.free2move.se/uploads/downloads/13_1239188364_Datasheet_F2M03GLA_rev_e.pdf?PHPSESSID=7617c04bd1bd7395475f47a71b02e539.

Desenvolvimento do Módulo

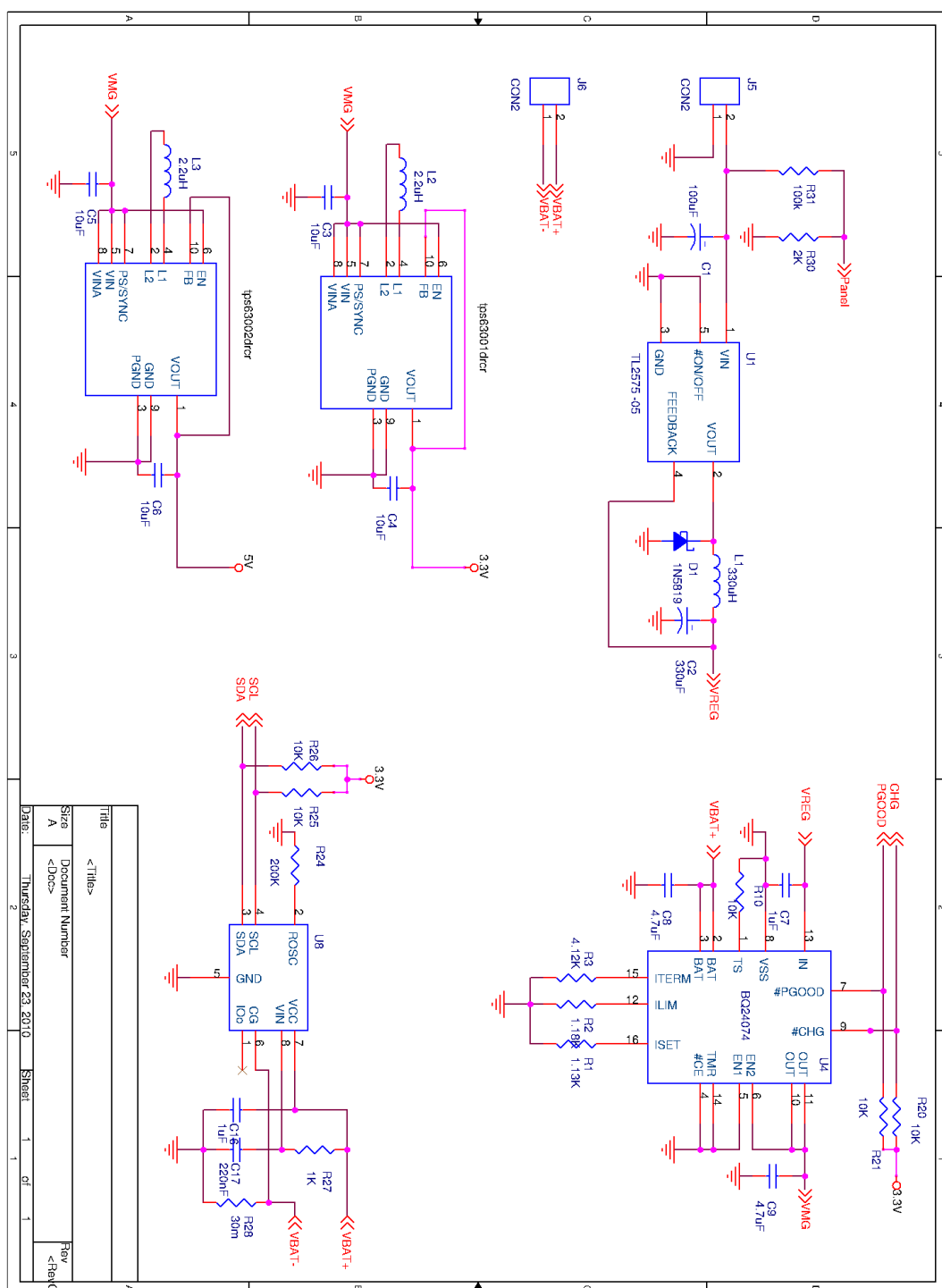


Figura A.1 Esquema do Bloco de Alimentação

Figura A.2 Esquema do Cartão de Memória, Switch e Conectores

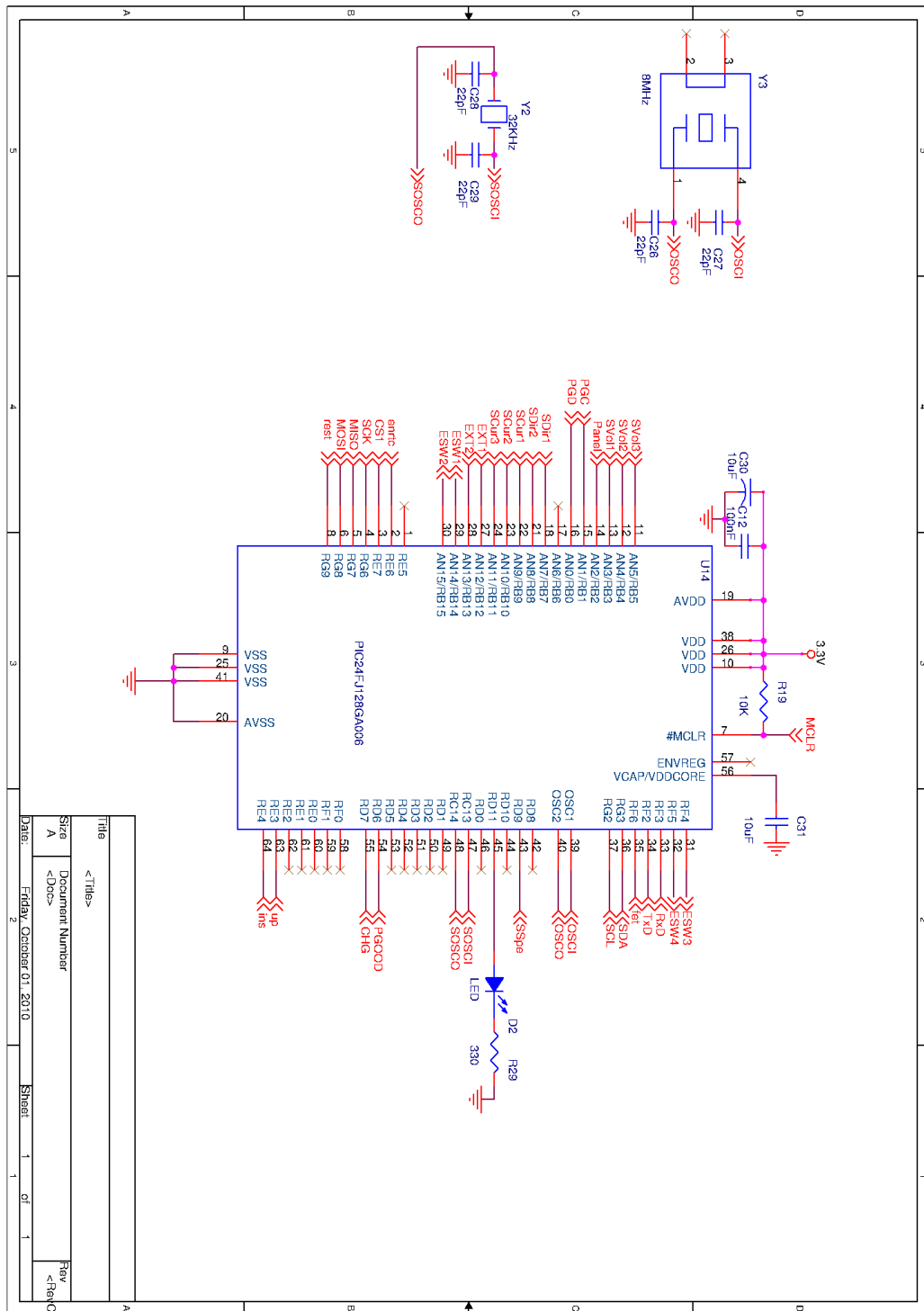


Figura A.3 Esquema do Microcontrolador

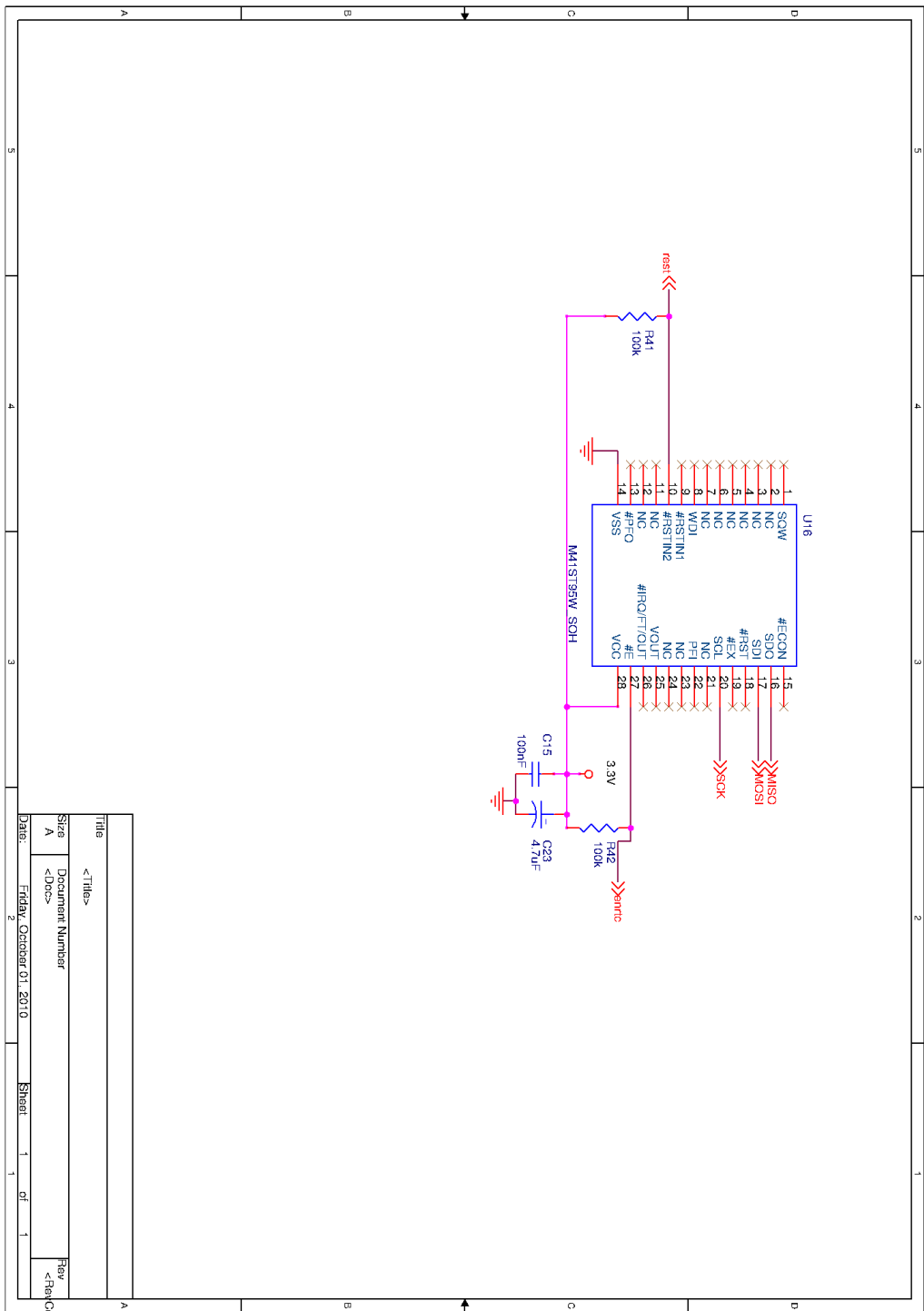


Figura A.4 Esquema do Relógio (RTCC)

Anexo B

Placa do Módulo

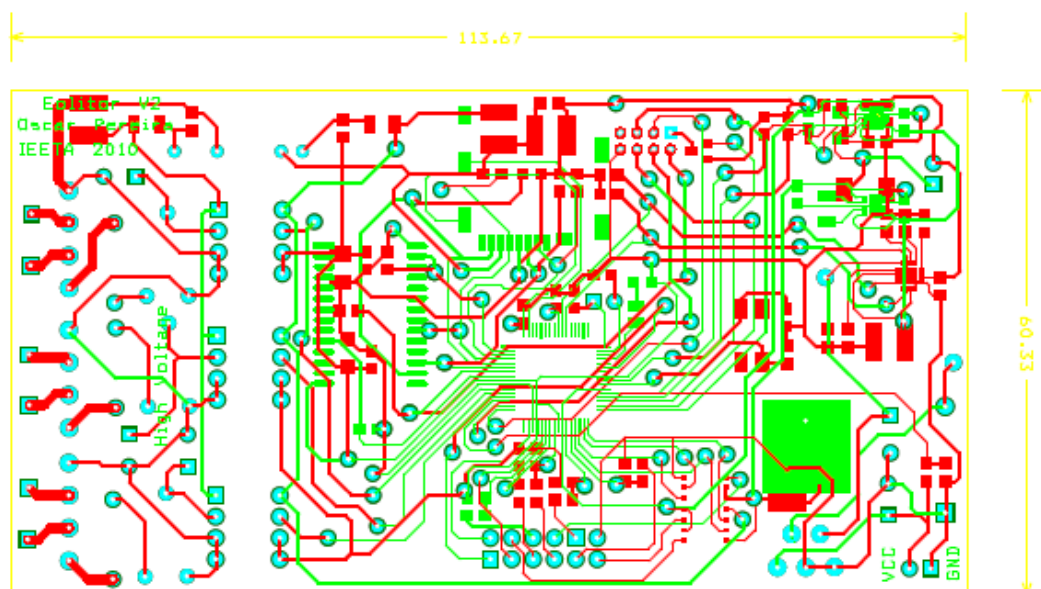


Figura B.1 Layout geral do Módulo Autónomo de Monitorização

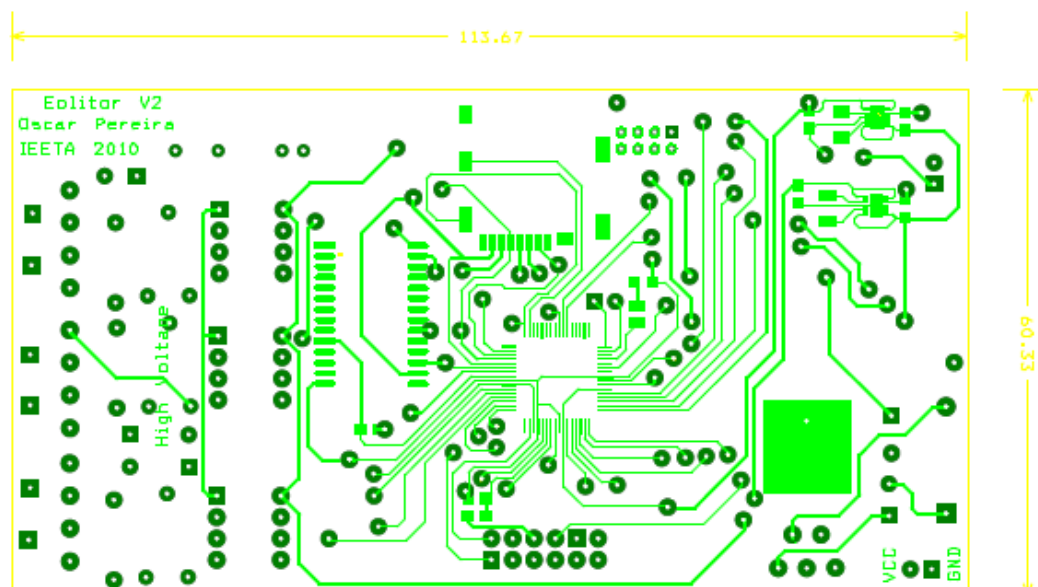


Figura B.2 Layout superior do Módulo Autónomo de Monitorização

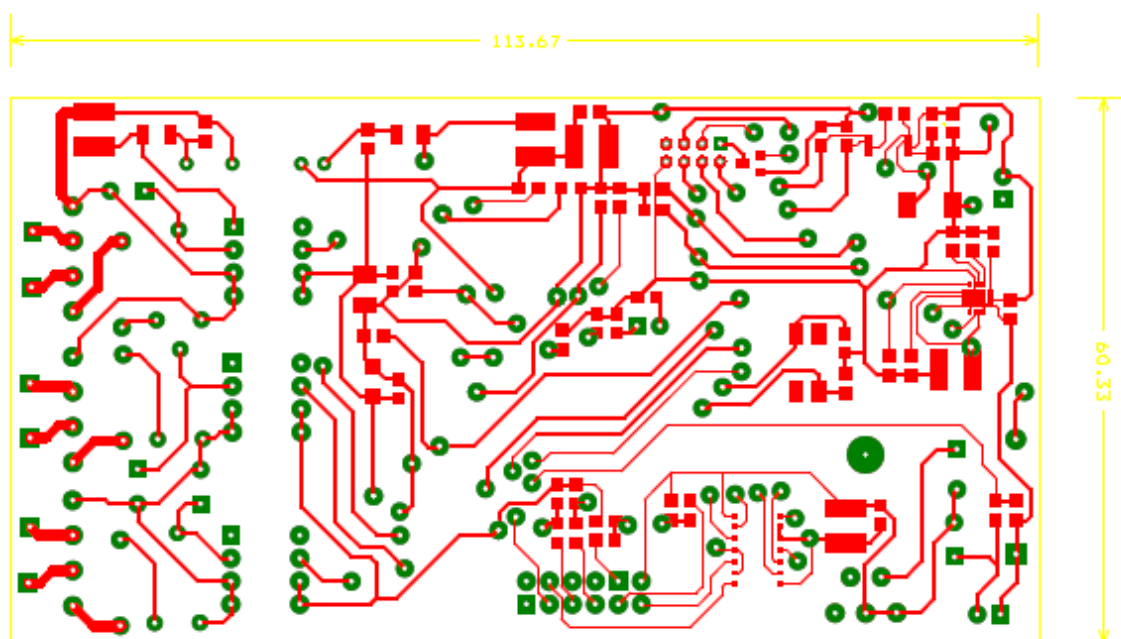


Figura B.3 Layout inferior do Módulo Autônomo de Monitorização.